CANMET

TIRS DE MINE POUR RELAXATION DES CONTRAINTES DANS LA MINE DE CAMPBELL RED LAKE

SP87 – 8F

89-04465/

TIRS DE MINE POUR RELAXATION DES CONTRAINTES DANS LA MINE DE CAMPBELL RED LAKE

A. MAKUCH, M. NEUMANN, D.G.F. HEDLEY ET W. BLAKE

LABORATOIRE D'ELLIOT LAKE

LABORATOIRES DE RECHERCHE MINIÈRE
RAPPORT SPÉCIAL SP 87-8F

PRIX D'EXCELLENCE DU CANADA 1986

MICROMÉDIA

PALME D'ARGENT EN TRANSFERT DE TECHNOLOGIE

Ce rapport a été publié dans le cadre
du projet de recherche conjoint
CANADA-ONTARIO-INDUSTRIE sur les coups de toit

45 pp

© Ministre des Approvisionnements et Services Canada 1989

En vente au Canada par l'entremise des

Librairies associées
et autres librairies

Centre d'édition du gouvernement du Canada
Approvisionnement et Services Canada
Ottawa (Canada) K1A 0S9

N° de catalogue M38—15/87—8F
ISBN 0-660-92638-5

TIRS DE MINE POUR RELAXATION DES CONTRAINTES DANS LA MINE DE CAMPBELL RED LAKE

PARTIE 1 : PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES APPLIQUÉS À LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS

PARTIE 2 : APPLICATIONS PRATIQUES DE LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS DANS LA MINE CAMPBELL

PARTIE 3 : TIRS DE MINE OBSERVÉS PAR DES INSTRUMENTS, EFFECTUÉS POUR RELAXER LES CONTRAINTES DANS LE PILIER DE COURONNE 1604E

par

T. Makuch*, M. Neumann**, D.G.F. Hedley† et W. Blake††

RÉSUMÉ

On emploie couramment dans les piliers sujets aux coups de toit, à l'intérieur des corps minéralisés minces et de fort pendage, des tirs de mine pour effectuer la relaxation des contraintes. Il s'agit de fracturer la roche et de réduire les contraintes qui s'exercent sur le pilier concerné. Depuis 1982, on a effectué quatre tirs de relaxation dans des piliers de la mine de Campbell Red Lake, avec plus ou moins de succès. En général, on a employé, pour préparer les tirs de relaxation, un procédé conforme au bon sens.

On a divisé ce rapport en trois parties. Dans la première, on examine le principe de la mécanique des roches en rapport avec la relaxation des contraintes. On cherche à identifier les paramètres qui favorisent un tir de relaxation réussi. La principale conclusion à laquelle on parvient est que la relaxation des contraintes sert principalement à réduire l'énergie potentielle de la masse rocheuse. Pour ce faire, on fracture le pilier et on laisse converger le toit et le mur de la galerie de mine.

Dans la seconde partie du rapport, on décrit les trois premiers tirs de relaxation effectués dans les piliers de couronne exploités par tranches montantes remblayées, et les piliers de base de chantier exploités par la méthode des chambres-magasins. On décrit dans cet article les raisons pour lesquelles on procède à la relaxation des contraintes, ainsi que la conception et les instruments utilisés, et les observations faites après les tirs de relaxation.

Mots-clés : Coups de toit; relaxation; surveillance.

*Ingénieur en chef chargé du contrôle du terrain, et **ingénieur en chef, Campbell Red Lake Mines Ltd., Balmertown (Ontario).

† Chercheur principal, Laboratoire d'Elliot Lake, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada, Elliot Lake (Ontario).

†† Ingénieur-conseil, Hayden Lake, Idaho, USA.

On a étroitement surveillé le quatrième tir de relaxation; on le décrit dans la troisième partie du rapport. On a aussi fait appel à la modélisation informatisée, pour comparer les résultats du modèle aux mesures in situ des contraintes et de la convergence.

DESTRESS BLASTING AT CAMPBELL RED LAKE MINE

PART 1: ROCK MECHANICS CONCEPTS OF DESTRESSING PILLARS
PART 2: PRACTICAL APPLICATIONS OF PILLAR DESTRESSING AT CAMPBELL MINE
PART 3: AN INSTRUMENTED DESTRESS BLAST OF THE 1604E CROWN PILLAR

by

T. Makuch*, M. Neumann**, D.G.F. Hedley† and W. Blake††

ABSTRACT

Destress blasting is commonly used in rockburst–prone pillars in thin steeply–dipping orebodies. The purpose is to fracture the rock and reduce the stresses acting on the pillar. Since 1982, four destress blasts have been done in pillars at Campbell Red Lake Mine, with varying degrees of success. In general a common–sense approach was used in the design of the destress blast.

This report is divided into three parts. The first part explores the rock mechanics concepts of destressing. It attempts to identify the parameters which make for a successful destress blast. The main conclusion is that the major purpose of destressing is to reduce the potential energy of the rock mass. This is achieved by fracturing the pillar and allowing the hanging wall and footwall to converge.

The second part of the report describes the first three destress blasts in cut–and–fill crown pillars and shrinkage boxhole pillars. The reasons for destressing, the design, instrumentation used and post–blast observations are documented.

The fourth destress blast was extensively monitored and is described in the third part of the report. Computer modelling was also undertaken to compare with the in situ measurement of stress and convergence.

Key words: Rockbursts; Destressing; Monitoring.

*Chief Ground Control Engineer, and **Chief Engineer, Campbell Red Lake Mines Ltd., Balmertown, Ontario.

† Senior Research Scientist, Elliot Lake Laboratory, CANMET, Energy, Mines and Resources Canada, Elliot Lake, Ontario.

†† Consulting Engineer, Hayden Lake, Idaho, U.S.A.

TABLE DES MATIÈRES

	Page
RÉSUMÉ	i
ABSTRACT	iii
PARTIE 1 : PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES APPLIQUÉS À LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS	1
INTRODUCTION	1
PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES APPLIQUÉS À LA RELAXATION DES CONTRAINTES	2
ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE	6
COMMENTAIRES	8
BIBLIOGRAPHIE	8
PARTIE 2 : APPLICATIONS PRATIQUES DE LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS DANS LA MINE CAMPBELL	10
INTRODUCTION	10
HISTORIQUE DES COUPS DE TOIT	10
PILIER DE COURONNE 1102 E. 'B' – SOUMIS À DES TIRS DE RELAXATION EN AVRIL 1982	11
Information de base	11
Préparation	11
Méthodes de mesure	13
Résultats	13
Observations	13
PILIERS DE BASE DE CHANTIER 1421 W. – 10 SEPTEMBRE 1982	15
Information de base	15
Préparation	15
Méthodes de mesure	15
Résultats	18
Observations	18
PILIER DE COURONNE 1902 E. – PILIER DE SOLE 1802 – 20 JANVIER 1984	18
Information de base	18
Préparation	19
Méthodes de mesure	19
Résultats	19
Observations	21

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

CONCLUSIONS 21

BIBLIOGRAPHIE 22

PARTIE 3 : TIRS DE RELAXATION EFFECTUÉS DANS LE PILIER DE COURONNE 1604 E, MESURÉS AU MOYEN D'INSTRUMENTS 23

INTRODUCTION 23

SÉQUENCE PRÉVUE D'EXTRACTION APRÈS LES TIRS DE RELAXATION DANS LE CAS DU PILIER DE COURONNE 1604 E 23

Méthodes de mesure 26

Modélisation informatisée 28

Résultats des essais in situ 33

COMMENTAIRES 34

REMERCIEMENTS 36

BIBLIOGRAPHIE 36

TABLEAUX

1. Variations mesurées et calculées des contraintes et des réductions de sections dans les galeries 33
2. Mesures des vibrations engendrées par les tirs de mine 33

FIGURES

1. Divers degrés de relaxation des contraintes (d'après Crouch, 1974) 3
2. Évolution des contraintes et déplacements dans un pilier durant un tir de relaxation 5
3. Composantes énergétiques durant un tir de relaxation des contraintes 7
4. Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'A' 12
5. Relaxation des contraintes dans le pilier de couronne 1102 E. 'B' : Disposition des tirs et résultats relatifs à la réduction de section des galeries 14
6. Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'F' 16
7. Relaxation des piliers de base 1421 W : disposition et résultats relatifs aux réductions de section des galeries 17
8. Pilier de couronne 1902 E. 'C' – pilier de sole 1802 E. 'C' : disposition des tirs de relaxation 20
9. Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'A–1' 24

TABLE DES MATIÈRES (suite)

Page

FIGURES (suite)

10. Disposition des tirs de relaxation effectués dans le chantier 1604 E 25
11. Disposition du réseau de géophones dans la mine Campbell 27
12. Disposition des instruments de mesure aux alentours du chantier 1604 29
13a. Plan d'exploitation minière des filons A, B et C selon le modèle informatisé 30
13b. Coupe montrant les filons A, B et C 31
14. Distribution des contraintes normales dans des conditions d'élasticité 32
15. Emplacements des épisodes sismiques après les tirs de relaxation 35

PARTIE 1 : PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES APPLIQUÉS À LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS

INTRODUCTION

On emploie depuis un certain nombre d'années les tirs de relaxation pour surmonter les problèmes que posent les états de fortes contraintes du sol et les coups de toit. Généralement, on considère que les tirs de mine fracturent la roche, réduisent son module de déformation, et transfèrent les contraintes dans les structures rocheuses adjacentes.

On a pour la première fois utilisé de façon systématique les tirs de relaxation dans les mines d'or en Amérique du Sud, durant les années 1950, pour créer une zone fracturée à l'avant d'un front de longue taille. On a indiqué (Roux et al. 1957) que ce procédé avait permis de réduire le nombre et la gravité des manifestations de coups de toit. On a aussi noté une réduction du nombre de victimes et du nombre de jours perdus, une amélioration de l'état du toit des galeries, et une diminution notable du nombre de coups de toit se produisant durant un poste de travail. Toutefois, on a apparemment abandonné cette méthode en raison de la difficulté à forer des trous relativement longs et à placer des explosifs dans un terrain soumis à de fortes contraintes. Plus tard, on a constaté que l'énergie libérée au cours d'un tir de relaxation n'était pas supérieure à l'énergie de l'explosif lui-même (Cook et al. 1966). Les enregistrements sismiques des coups de toit ont montré que les deux tiers de l'énergie libérée étaient contenus dans la composante verticale des ondes de cisaillement. Les enregistrements similaires des tirs de relaxation et des tirs habituels ont indiqué que la majeure partie de l'énergie était contenue dans l'onde radiale de compression, et qu'une partie négligeable de cette énergie se retrouvait dans l'onde verticale de cisaillement.

Dans les mines nord-américaines, on emploie à plus grande échelle des procédés de relaxation des contraintes, et l'on obtient apparemment de meilleurs résultats. On effectue régulièrement des tirs de relaxation dans les piliers de sole des mines, dans le district de Coeur d'Alene du nord de l'Idaho. Blake (1972) et Board (1983) ont cité les résultats d'essais in situ ayant fait l'objet de mesures. Normalement, la relaxation se produit lorsque l'épaisseur des piliers de sole a été réduite jusqu'à 10 ou 12 m, et lorsque ceux-ci subissent de fortes contraintes. Un autre principe est celui du conditionnement préalable, les forages et tirs de mine étant effectués avant l'extraction du minerai, et la roche se trouvant donc soumise au plus faible niveau de contraintes. Le conditionnement préalable réduirait de façon notable l'activité sismique durant l'exploitation minière (Blake, 1982).

Dans les mines canadiennes, on effectue habituellement les tirs de relaxation dans les piliers de sole, à l'intérieur de corps minéralisés minces et de fort pendage, comme ceux de la mine de Campbell Red Lake, de la mine Dickenson, de la mine Falconbridge (Moruzi et Pasieka, 1964) et des mines de Kirkland Lake (Cook, 1983). Parmi les autres applications des techniques de tirs de relaxation des contraintes, figurent les travaux miniers préparatoires, y compris le creusement des puits de mine et des galeries d'accès (Garrood, 1982). Bien qu'au Canada, on utilise à une échelle importante les tirs de relaxation dans les mines de roche dure, il existe peu de documentation sur le sujet.

PRINCIPES DE LA MÉCANIQUE DES ROCHES APPLIQUÉS À LA RELAXATION DES CONTRAINTES

On utilise les tirs de relaxation avec succès dans les mines d'Amérique du Nord, mais l'on dispose de très peu d'information théorique de base sur l'évolution réelle des contraintes, des déplacements et de l'énergie durant ce type de tir. On est généralement de l'avis que la relaxation des contraintes réduit la dureté de la roche et son module effectif d'élasticité. Mais les avis sont partagés, à propos de la nécessité de réduire les contraintes et l'énergie de déformation emmagasinée à l'intérieur de la roche que l'on soumet aux tirs de relaxation.

Crouch (1974) a étudié les états de contraintes et déformations, avant et après les tirs de relaxation. Il a postulé qu'il existait des degrés sous-critiques, critiques et surcritiques de relaxation, comme l'illustre la figure 1. Après le tir de relaxation, l'équilibre final entre les contraintes et déformations est fonction de l'intersection de la ligne du module de relaxation et de la pente de rigidité locale du terrain de la mine. Si ce point d'intersection se trouve à l'intérieur de l'enveloppe des contraintes et des déformations (c.-à-d. dans le domaine sous-critique), le tir de relaxation sera sans effet. Toutefois, si ce point d'intersection se situe à l'extérieur de l'enveloppe (c.-à-d. dans le domaine surcritique), l'énergie excédentaire sera libérée, et finalement l'équilibre sera atteint le long de la courbe de résistance résiduelle. Crouch (1974) et Blake (1972) affirment tous deux que la relaxation est d'autant plus efficace que l'état de contrainte du pilier se rapproche davantage du point de rupture de ce pilier. Crouch (1974) indique aussi que l'énergie excédentaire libérée lors d'un tir de relaxation ou d'un coup de toit, vient de la variation d'énergie potentielle de la masse rocheuse, et non de l'énergie de déformation emmagasinée dans le pilier.

Dans ces études, on a examiné les effets antérieurs et ultérieurs à la relaxation, et non ce qui se produit durant le tir lui-même. Lorsqu'on fait détoner une charge explosive dans un sondage, une onde de pression ou onde de choc se propage de façon concentrique vers l'extérieur, en produisant des fractures radiales autour du sondage. En se dilatant, les gaz ouvrent et élargissent ces fissures, et déplacent (c.-à-d. rejettent) les fragments rocheux. Lors d'un tir de relaxation, l'explosif est confiné, et normalement on ne le trouve qu'à une certaine distance d'une face rocheuse libre. Dans ces conditions, l'onde de choc est la principale source de fragmentation, et la plupart des gaz s'échappent probablement par l'orifice du trou de sondage. En général, l'énergie sismique contenue dans l'onde de choc représente 5 à 10 % de l'énergie chimique totale de l'explosif (Duvall et Stephenson, 1966).

Dans un milieu élastique, l'augmentation de la contrainte radiale, $\Delta\sigma r$, peut s'exprimer de la façon suivante :

$$\Delta\sigma r = P\left(\frac{r}{R}\right)^2 \qquad \text{Éq. 1}$$

où, P = pression dans le sondage
r = rayon du sondage
R = distance du sondage

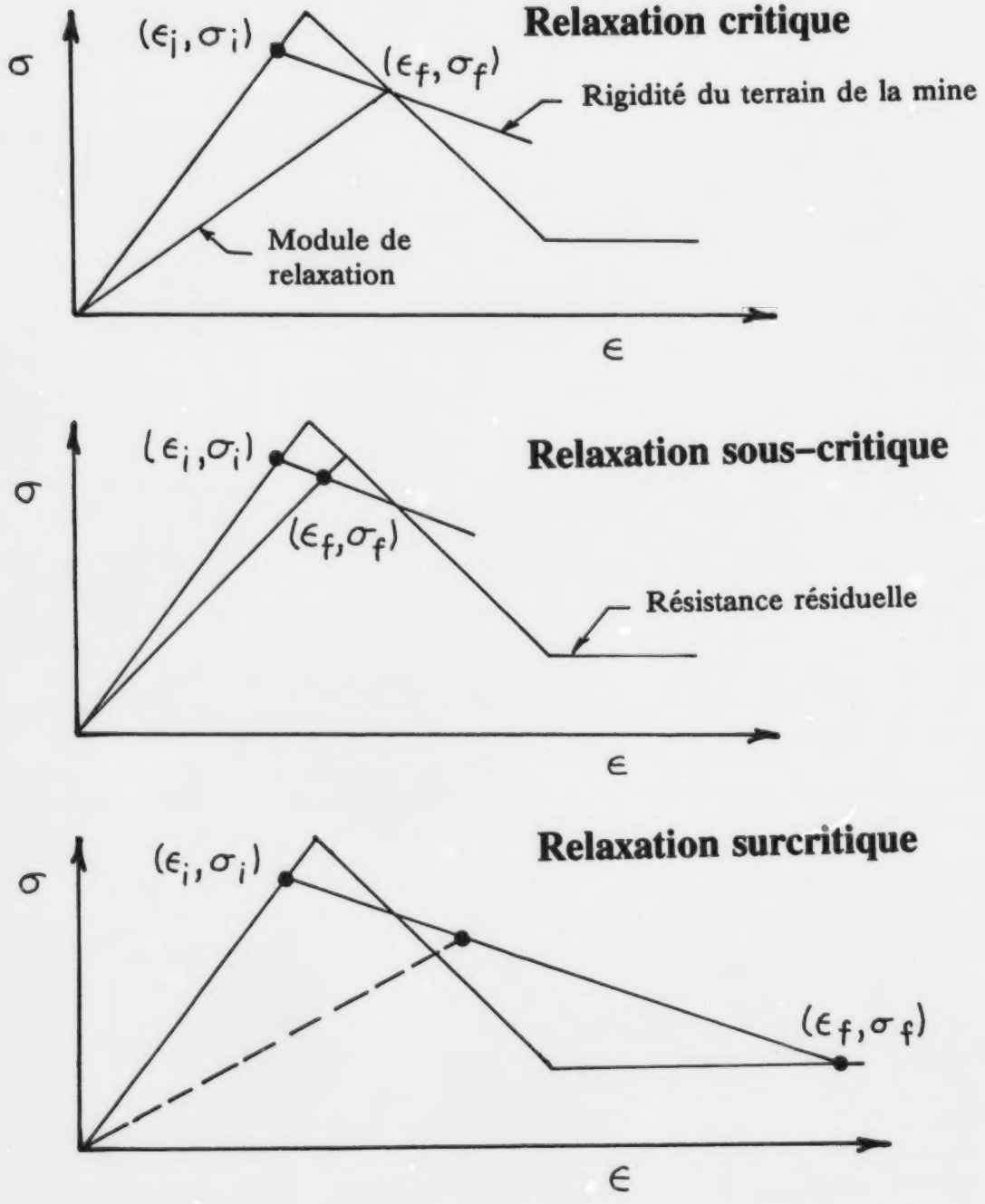


Figure 1 – Divers degrés de relaxation des contraintes (d'après Crouch, 1974).

Dans le cas des explosifs commerciaux, la pression dans le sondage est de l'ordre de 200 à 8000 MPa (Coates, 1981). L'équation 1 indique que la variation de la contrainte radiale diminue rapidement à mesure que l'on s'éloigne du sondage. Lorsque R = 10r, la variation des contraintes ne représente que 1 % de la pression dans le sondage. En roche dure typique, le coefficient de puissance se rapproche probablement davantage de 2,5 que de 2, ce qui indique un plus grand amortissement de l'onde de choc.

On peut aussi exprimer la variation de la contrainte radiale par :

$$\Delta\sigma r = \gamma\, Cp\, v \qquad \text{Éq. 2}$$

où γ = densité de la roche
Cp = vitesse de propagation de l'onde de pression
v = vitesse des particules

La vitesse de propagation des fissures ne représente qu'environ 15 à 40 % de celle de l'onde de pression (Coates, 1981). Donc, initialement, le pilier ne subit qu'une augmentation des contraintes, sans qu'une réduction du module d'élasticité soit causée par la fracturation; cette réduction a lieu plus tard.

On peut maintenant considérer la surimposition d'une charge dynamique explosive à une charge statique, en fonction du couple contraintes–déplacements auquel est soumis un pilier, comme l'indique la figure 2. La figure 2a montre l'onde de pression qui se propage de façon concentrique à partir des sondages de relaxation des contraintes. Au moment où ces ondes frappent le mur ou le toit, elles ont probablement fusionné et forment un front unique. La figure 2b montre l'équivalent mécanique d'un tir de relaxation; on utilise pour cette expérience un mince vérin plat qui peut être instantanément pressurisé et qui est installé à mi–hauteur du pilier. Ceci n'est pas l'équivalent exact d'un tir, puisque l'onde de pression explosive est de caractère transitoire. La figure 2c indique l'évolution du couple contraintes–déplacements au toit ou au mur. Durant un tir de relaxation, il se produit probablement les phénomènes suivants :

a) Immédiatement avant le tir, le pilier se trouve dans des conditions statiques quant au couple contraintes–déplacements, au point A, le module d'élasticité étant E_1.

b) Après la détonation, l'onde de pression rayonne vers l'extérieur et accroît les contraintes qui s'exercent sur le toit et le mur, comme lorsqu'on pressurise le vérin plat. Cette pression interne induit la séparation du mur et du toit le long de la ligne AB, qui est la pente de la courbe de rigidité locale de la mine.

c) La fracturation se produit après le passage de l'onde de pression, comme s'il y avait rupture du vérin plat. Il en résulte probablement, après le passage de l'onde de pression, une chute soudaine des contraintes jusqu'au point C, chute dont l'importance est probablement égale à l'augmentation des contraintes provoquée par la détonation de l'explosif. Ensuite, se produit une autre réduction des contraintes à mesure que le toit et le mur convergent. Le pilier acquiert un module réduit d'élasticité E2, en raison de la fracturation qui se produit au point D.

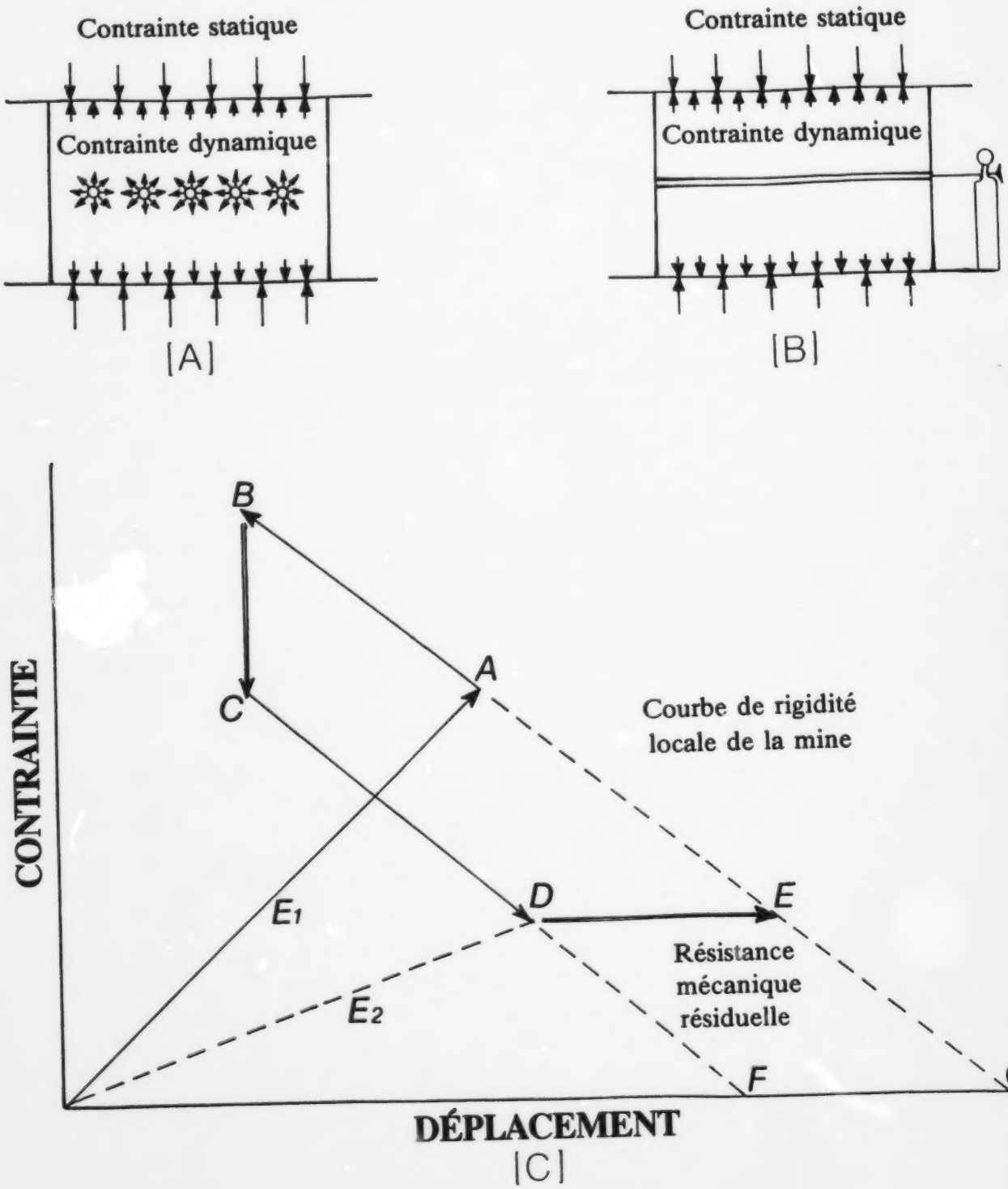


Fig. 2 – Évolution des contraintes et déplacements dans un pilier durant un tir de relaxation.

d) L'équilibre n'est pas encore atteint, et les déplacements se poursuivent suivant la courbe de résistance résiduelle, jusqu'à ce qu'ils recoupent la courbe de rigidité locale de la mine au point E.

e) S'il s'agissait d'un tir de production et non d'un tir de relaxation, la détente se poursuivrait selon la ligne DF, jusqu'à ce que le niveau zéro de contraintes soit atteint. Cependant, à nouveau, l'équilibre n'est pas atteint avant que le toit et le mur convergent au point G, qui représente l'intersection avec la courbe de rigidité locale de la mine.

ÉVALUATION DE L'ÉNERGIE

On peut maintenant étudier les composantes énergétiques qui interviennent dans le tir de relaxation. D'après Salamon (1974), le bilan énergétique résultant de l'exploitation minière peut s'exprimer par :

$$Wt + Um = Uc + Wr \qquad \text{Éq. 3}$$

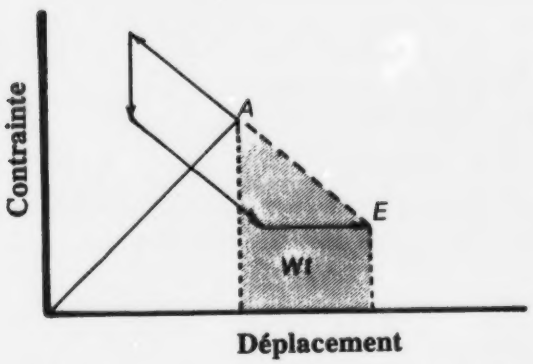
où, Wt = variation d'énergie potentielle
Um = énergie de déformation emmagasinée dans le produit que l'on extrait de la mine
Uc = énergie de déformation accrue dans la roche environnante
Wr = énergie libérée

En l'absence d'un soutien quelconque, par exemple d'un remblai, l'énergie libérée se compose de l'énergie de déformation emmagasinée dans le produit que l'on extrait de la mine, Um, et de l'énergie sismique Wk, qui cause la vibration de la masse rocheuse. Lors d'un tir de relaxation, interviennent des composantes énergétiques supplémentaires, et l'équation 3 devient :

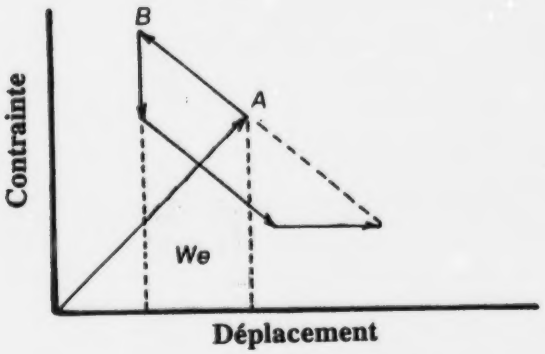
$$Wt + Um_1 + We = Uc + Um_2 + Wf + Wk \qquad \text{Éq. 4}$$

où Um_1 = énergie de déformation emmagasinée avant la relaxation
Um_2 = énergie de déformation emmagasinée après la relaxation
We = énergie explosive
Wf = énergie consommée par la fracturation de la roche

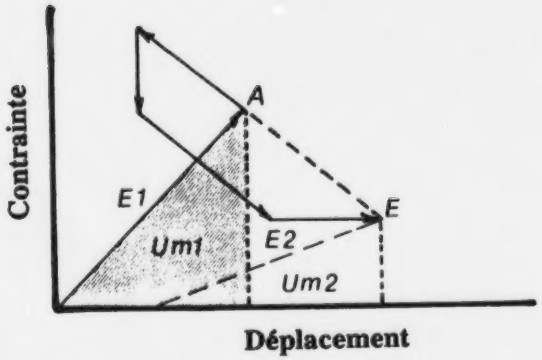
La figure 3 est une illustration des composantes énergétiques. La variation nette d'énergie potentielle est la surface contenue au–dessous de la ligne AE, comme indiqué à la figure 3a). L'énergie explosive employée pour repousser le toit et le mur est la surface contenue sous la ligne AB, comme indiqué à la figure 3b). Il existe une énergie explosive supplémentaire, par exemple l'énergie thermique et celle des gaz en expansion, dont on n'a pas tenu compte, et qui n'influe pas sur le bilan énergétique. La figure 3c) indique les énergies de déformation emmagasinées avant et après la relaxation; elles représentent aux points A et E respectivement la contrainte et le module d'élasticité. L'énergie utilisée par la fracturation de la roche est la surface contenue au–dessous de l'enveloppe contrainte–déplacement moins l'énergie de déformation emmagasinée qui subsiste dans le pilier fracturé, comme l'indique la figure 3d). L'énergie sismique libérée est la surface extérieure à l'enveloppe contrainte–déplacement, comme indiqué à la figure 3e). Elle a deux composantes: celle créée par l'explosif qui a repoussé le toit ou le mur et celle due à la variation d'énergie potentielle de la masse rocheuse.



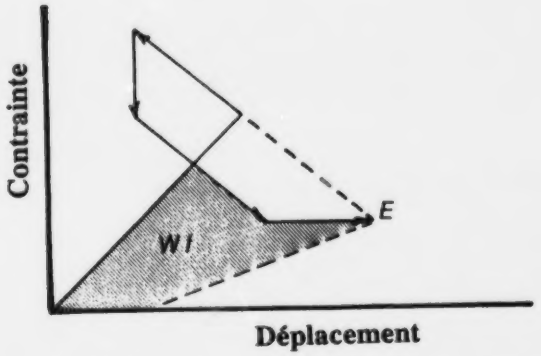
[A] Variation nette d'énergie potentielle



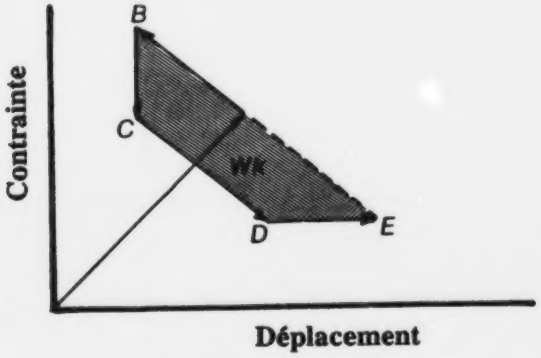
[B] Énergie explosive dont l'effet est de repousser les parois



[C] Énergie de déformation emmagasinée avant et après la relaxation des contraintes



[D] Énergie consommée (à l'exclusion de l'énergie explosive) par la fracturation des piliers



[E] Énergie sismique libérée

Fig. 3 – Composantes énergétiques durant un tir de relaxation des contraintes.

COMMENTAIRES

Ceci n'est qu'une représentation simpliste des phénomènes survenant durant un tir de relaxation, mais l'on peut formuler un certain nombre de déductions fondamentales d'après l'évolution du couple contraintes–déplacements telle que représentée à la figure 2, et des composantes énergétiques représentées à la figure 3.

a) En relaxant les contraintes, on cherche principalement à réduire l'énergie potentielle de la masse rocheuse environnante; Crouch (1974) était parvenu à la même conclusion. Pour cela, on réduit le module et les contraintes s'exerçant sur le pilier. Aux figures 2c) et 3a), la diminution d'énergie potentielle va du point A au point E. On obtient une autre réduction d'énergie potentielle, lorsqu'on exploite le pilier dans lequel les contraintes ont été relaxées, jusqu'à ce que le point G soit atteint. Plus le point E se rapproche du point G, plus le tir de relaxation est efficace; toutefois, on doit considérer ce facteur vis–à–vis des difficultés pratiques que représente l'exploitation minière d'un terrain extrêmement fracturé.

b) Que le pilier ait subi une relaxation des contraintes puis une exploitation minière, ou bien qu'il ait été extrait au moyen de tirs de production ou ait subi une rupture causée par un coup de toit, le point final est toujours le même, c'est–à–dire le point G de la figure 2c).

c) L'énergie de déformation accumulée dans le pilier est utilisée par le processus de fracturation, et n'est pas libérée sous forme d'énergie sismique.

d) L'explosif sert non seulement à déclencher le processus de fracturation, mais encore à repousser le toit/le mur.

e) L'énergie sismique libérée provient en partie de l'explosif, en partie de la variation d'énergie potentielle. Elle est libérée durant la seconde partie du cycle.

BIBLIOGRAPHIE

Blake, W. (1972), Rockburst Mechanics, Colorado School of Mines, Publication trimestrielle vol. 67, n° 1.

Blake, W. Destress test at the Galena Mine, Trans. SME–AIME 1972, vol. 252.

Blake, W. Rock preconditioning as a seismic control measure in mines: Rockbursts and Seismicity in Mines, Johannesburg, S. Afr. Inst. Min. Met., Séries Symp. n° 6, 1982.

Board, M.P. et Fairhurst, C. Rockburst control through destressing – un cas d'espèce. Symposium sur les coups de toit: Prédiction et contrôle, 1983, p. 91–102.

Coates, D.F. Principes de la mécanique des roches; chapitre 8, monographie 874 (révisée), Énergie, Mines et Ressources Canada, 1981.

Cook, N.G.W., Hoek, E., Pretorius, J.P.G., Ortlepp, W.D. et Salamon, M.D.G. Rock mechanics applied to rockbursts, J. S. Afr. Inst. Min. Met., Mai 1966, p. 435–528.

Cook, J.F. et Bruce, D. Rockbursts at Macassa Mine and the Kirkland Lake mining area, Symposium sur les coups de toit: Prédiction et contrôle, Imm. London, 1983, p. 81–90.

Crouch, S.L. Analysis of rockbursts in cut–and–fill stopes, Trans. SME–AIME, 1974, vol. 256, p. 298–303.

Duvall, W.I. et Stephenson, D.F. Seismic energy available from rockbursts and underground explosions, Trans. AIME, 1965, p. 235–240.

Garrood, P.S. Ground control aspects of the development at Creighton No. 11 shaft, 14^{e} symposium sur la mécanique des roches, Vancouver, 1982.

Moruzi, G.A. et Pasieka, A.R., Evaluation of a blasting technique for destressing ground subject to rockbursting, (1964) 6^{e} symposium (É.–U.) sur la mécanique des roches, Rolla, Missouri.

Roux, A.J.A., Leeman, E.R. et Denkhaus, H.G. Destressing: a means of ameliorating rockburst conditions. Part I: the concept of destressing and results obtained from its application, J. S. Afr. Inst. Min. Met., Octobre 1957, p. 101–127.

Salamon, M.D.G. Rock mechanics of underground excavations, compte rendu du 3^{e} Congrès, Int. Soc. Rock Mech., Denver, Colorado, vol. 1, partie B, 1974, p. 951–1099.

PARTIE 2 : APPLICATIONS PRATIQUES DE LA RELAXATION DES CONTRAINTES SUBIES PAR LES PILIERS DANS LA MINE CAMPBELL

INTRODUCTION

La mine de Campbell Red Lake est un producteur primaire d'or, et se trouve à Balmertown dans le district de Red Lake au nord–ouest de l'Ontario. La production a commencé dans la mine en 1949, au rythme de 350 tonnes par jour, et l'exploitation se déroule actuellement jusqu'à l'horizon de 900 mètres à un rythme légèrement supérieur à 1 100 tonnes par jour. Un puits central à quatre compartiments atteint une profondeur de 1 315 mètres, et contient 27 niveaux à des intervalles de 45 mètres. La production vient surtout de l'exploitation par tranches montantes remblayées avec front de taille en surplomb; comme remblai, on emploie des stériles granoclassés et des sables alluviaux. On ajoute du ciment pour exploiter les planchers et bouchons des niveaux de fond. On rencontre la majorité du minerai dans des filons de remplacement et filons de fissure contenus dans une andésite très fragile. Les filons de remplacement se situent dans des flexures des unités de roche andésitique altérée, ont en général 2 à 12 mètres de large, et sont prolongés par d'étroites apophyses. Les filons de fissure sont des filons quartzo–carbonatés étroits, entièrement contenus dans l'andésite, et cela dans toutes les zones excepté une.

On emploie depuis un certain nombre d'années les tirs de relaxation pour surmonter les problèmes que posent les terrains exposés à de fortes contraintes et les coups de toit. On considère généralement que les tirs fracturent la roche, réduisent son module de déformation et transfèrent les contraintes dans les structures rocheuses adjacentes.

Généralement, dans la mine Campbell, des problèmes surviennent dans les structures dures et fragiles, de fort pendage, lorsque l'extraction réduit à 20 % la dimension des piliers de soutien. On a effectué trois essais pour relaxer les contraintes dans des piliers de couronne et piliers de sole extraits par la méthode des tranches montantes remblayées, et un essai pour réduire les contraintes dans les piliers de base de chantier extraits par la méthode des chambres–magasins. Dans cet article, on décrit chacun des trois types de tirs de relaxation, y compris le contexte minier, les travaux de préparation, les méthodes de mesure, la disposition des sondages, les charges explosives spécifiques, et l'activité ultérieure aux tirs. On n'a pas cherché à expliquer les détails théoriques des tirs de relaxation, mais plutôt à exposer pourquoi l'on a réalisé des tirs de relaxation, et à présenter des observations et des résultats. Dans la partie 3 de ce rapport, on décrit un quatrième tir de relaxation que l'on a observé en détail.

HISTORIQUE DES COUPS DE TOIT

On a pour la première fois enregistré des coups de toit ou des ruptures violentes de piliers dans la mine Campbell au début des années 60; ces phénomènes se sont produits dans des piliers de couronne et piliers de base de chantier à l'intérieur des galeries exploitées par chambres–magasins. Depuis 1983, on a enregistré au moins 10 coups de toit d'intensité supérieure à 2,0, et même un d'intensité égale à 3,1.

On a identifié dans la mine Campbell à la fois des coups de toit avec rupture de piliers et des coups dus à la libération de l'énergie de déformation élastique. Les coups survenant dans les piliers

se manifestent par une rupture violente des piliers souterrains soumis à de fortes contraintes, tandis que les coups dus à la libération de l'énergie de déformation élastique sont le résultat d'une forte concentration locale des contraintes à proximité de travaux souterrains de découpage. Les coups dus à l'énergie de déformation sont plus fréquents, et se manifestent par des secousses près des fronts de taille productifs, et habituellement n'ont qu'un impact restreint sur les activités d'exploitation minière. Par contre, les coups survenant dans les piliers, bien qu'ils soient moins fréquents, ont généralement une plus grande intensité, et peuvent avoir des incidences plus sérieuses du point de vue de la sécurité du personnel employé dans les galeries souterraines. Les piliers de couronne de la mine Campbell subissent des contraintes critiques et sont sujets à des coups de toit, lorsque leur épaisseur se rapproche de 6 m, ou bien lorsque le taux d'extraction se rapproche de 80 %.

Pour pallier les problèmes des coups de toit, et permettre une extraction des piliers de couronne dans des conditions sûres et efficaces, on a adopté des techniques de relaxation des contraintes dans cette mine.

PILIER DE COURONNE 1102 E. 'B' – SOUMIS À DES TIRS DE RELAXATION EN AVRIL 1982

INFORMATION DE BASE

La zone minéralisée 'A' de la mine de Campbell Red Lake est un étroit filon de fissure allant de la surface à une profondeur connue de 900 m au niveau 20, comme indiqué à la figure 4. Cette zone, qui constitue la zone 'de découverte', a été rapidement exploitée de la surface au niveau 10, par la méthode des chambres–magasins avec exploitation des piliers de base. On est passé à la méthode d'exploitation par tranches montantes remblayées aux niveaux 11 et 12, et l'on a continué plus haut l'exploitation par chambres–magasins avec retrait des piliers de sole. À mesure que les chantiers 1102 E exploités par chambres remblayées se rapprochaient du niveau 10, l'activité a augmenté de façon considérable, et des coups sont survenus dans les piliers de base du chantier au niveau 10. En procédant à une lente exploitation de petites sections, on a amené le chantier au niveau 10 sur une longueur de 200 m. Sur le remblai, on a installé des voûtes en acier pour pouvoir accéder en toute sécurité au minerai de la partie est. On a cherché à plusieurs reprises à extraire la portion restante du chantier 1102 E, mais à chaque fois, des problèmes de contraintes élevées ont entraîné l'interruption des travaux. C'est à ce moment–là que l'on a décidé de soumettre le pilier à un tir de relaxation.

PRÉPARATION

Au niveau 10, on a installé dans la galerie de nombreux boulons d'ancrage, et colmaté celle–ci en employant un treillis métallique à éléments d'acier articulés, et une combinaison de boulons à ancrage mécanique (boulons fendus et boulons scellés à la résine). À l'emplacement de l'orifice de cheminée entre les bases de chantier, on a placé des cadres lourds en bois et en acier, pour empêcher l'écoulement des tas de déblais dans la galerie. On a construit un accès au chantier en installant deux cheminées, une à l'extrémité est et une à l'extrémité ouest du bloc, et un compartiment de circulation entre le chantier et le niveau 11. En employant un marteau perforateur téléscopique, des tubes de rallonge en acier et des lames de trépan de 45 mm, on a foré des trous à des intervalles de

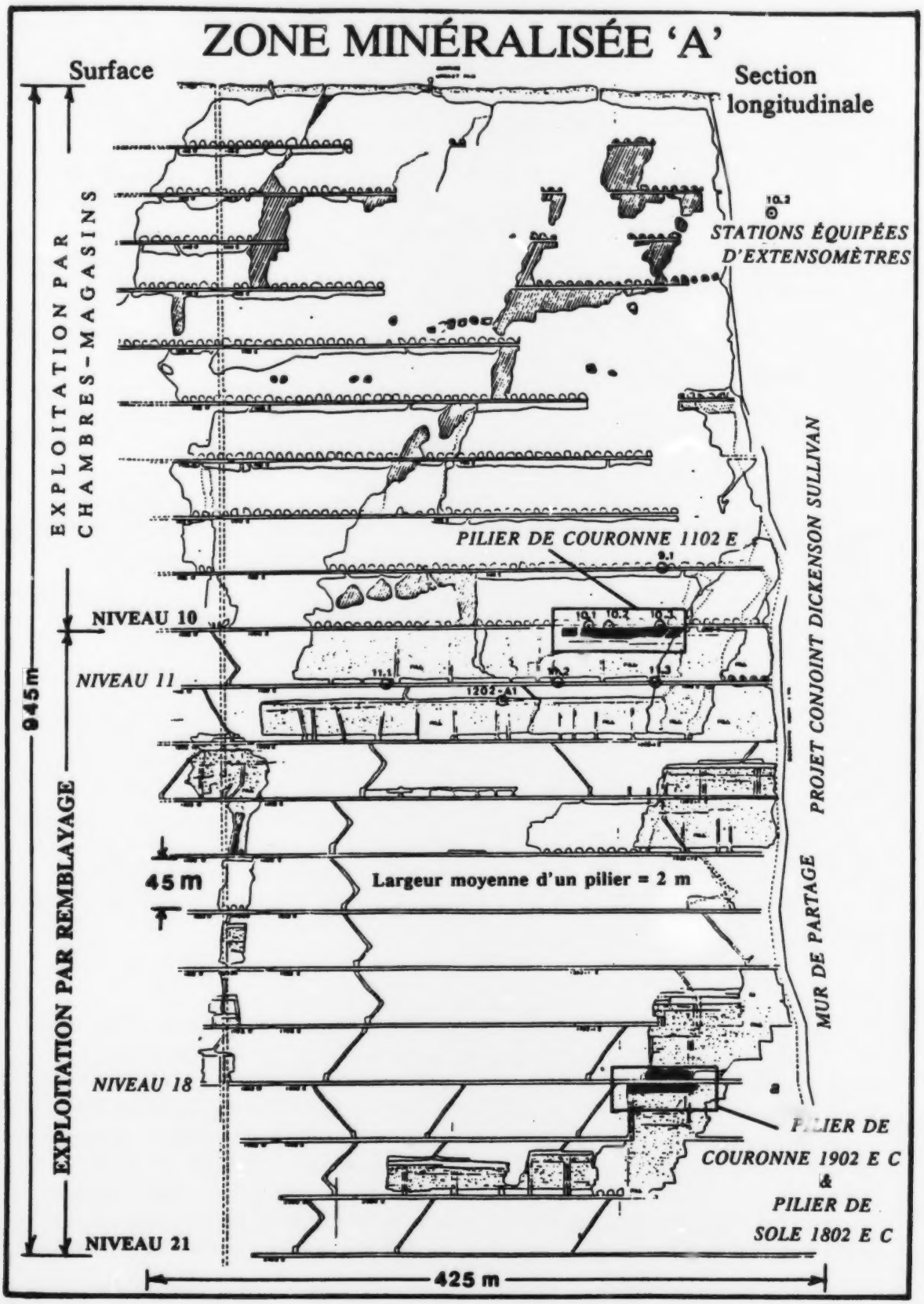


Fig. 4 – Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'A'

1,8 m entre le chantier et le niveau de 1,5 m ou moins par rapport à la hauteur du rail, comme indiqué à la figure 5. On a foré la petite section ouest isolée pour fracturer la roche, en même temps que l'on effectuait le tir de relaxation. On a chargé tous les trous avec de l'ANFO (nitrate–fuel) et l'on y a placé une cartouche amorce avec détonateur électrique, excepté dans la partie devant subir le débitage.

MÉTHODES DE MESURE

On a cimenté les chevilles des extensomètres aux parois des niveaux 9, 10 et 11 pour mesurer la réduction de section des parois. La figure 5 indique la disposition des extensomètres au niveau 10.

RÉSULTATS

Le tir a été effectué le vendredi 1er mai. Bien que le tir ait été ressenti en surface, aucun coup de toit ne s'est manifesté après celui–ci. Le matin du lundi 3 mai, on a inspecté la zone, et mesuré les stations équipées d'extensomètres au niveau 10. On a pu accéder au chantier par les deux remontages, bien que la voie ait été soulevée et le ballast fin déplacé. On a constaté que le treillis avait retenu une quantité considérable de matériaux détachés des parois, et l'on a visuellement noté une réduction évidente de la section des parois, que l'on a mesurée dans tous les secteurs, excepté dans la station 10–2 équipés d'extensomètres, au–dessous du pilier de base de chantier n° 38. Dans ce chantier, l'extrados était fortement fracturé et ébranlé autour des trous forés en vue des tirs de relaxation, mais autrement en bon état. Durant la période d'inspection dont la durée a dépassé une heure, personne n'a entendu le moindre claquement. Il s'est avéré que l'essai de relaxation avait réussi, et que l'on pouvait reprendre l'exploitation minière.

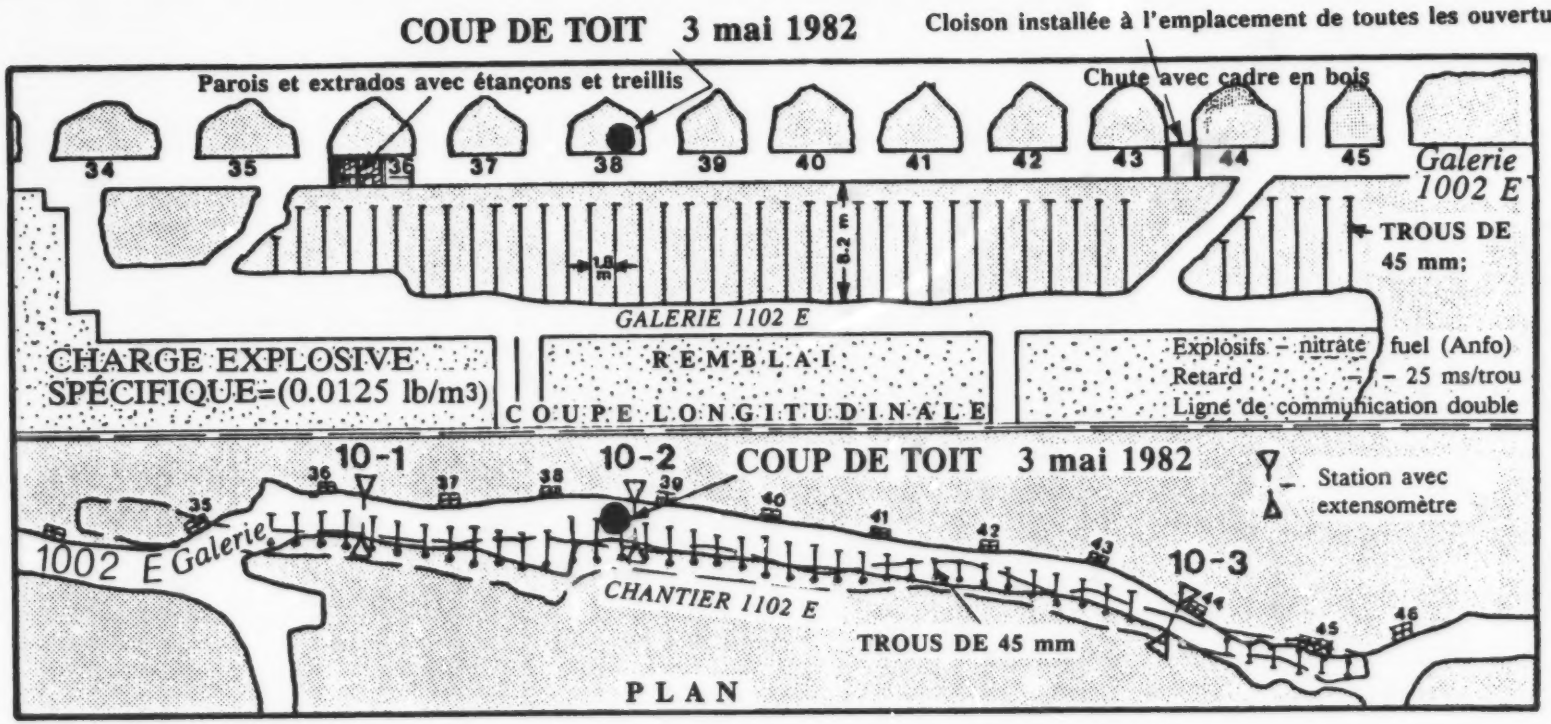
À 19 h 40, le même soir, un coup de toit a été ressenti au niveau de la surface. À ce moment–là, ne disposant pas d'un système d'enregistrement microsismique, on a cherché à déterminer l'emplacement de ce coup de toit dans le sous–sol. En inspectant la galerie 1002 E, on a constaté qu'un coup de toit s'était produit dans le pilier de base n° 38 du chantier, où l'on avait auparavant mesuré une faible réduction de section, comme l'indique la figure 5. On a mesuré une importante réduction à l'emplacement de la station 10–2, mais noté de très faibles variations dans les autres stations.

OBSERVATIONS

Les piliers de base des chantiers du niveau 10 n'étaient pas visibles en raison des boisages, mais on a pu constater que les piliers de base du niveau 10 avaient tous subi une rupture. Il est possible que le coup de toit ait eu lieu dans le pilier de couronne, et que les effets en soient visibles dans le pilier de base du chantier.

Il a été clairement démontré qu'une réduction de section doit avoir eu lieu, pour que les tirs de relaxation réussissent.

On a foré des trous jusqu'à une distance de 1,5 m ou moins du niveau des rails. On n'a pas tenu compte du fait que la roche solide se trouvait entre 0,3 et 1 m plus bas, et pour cette raison, le mur de la galerie et les voies ont subi des dommages démesurés.



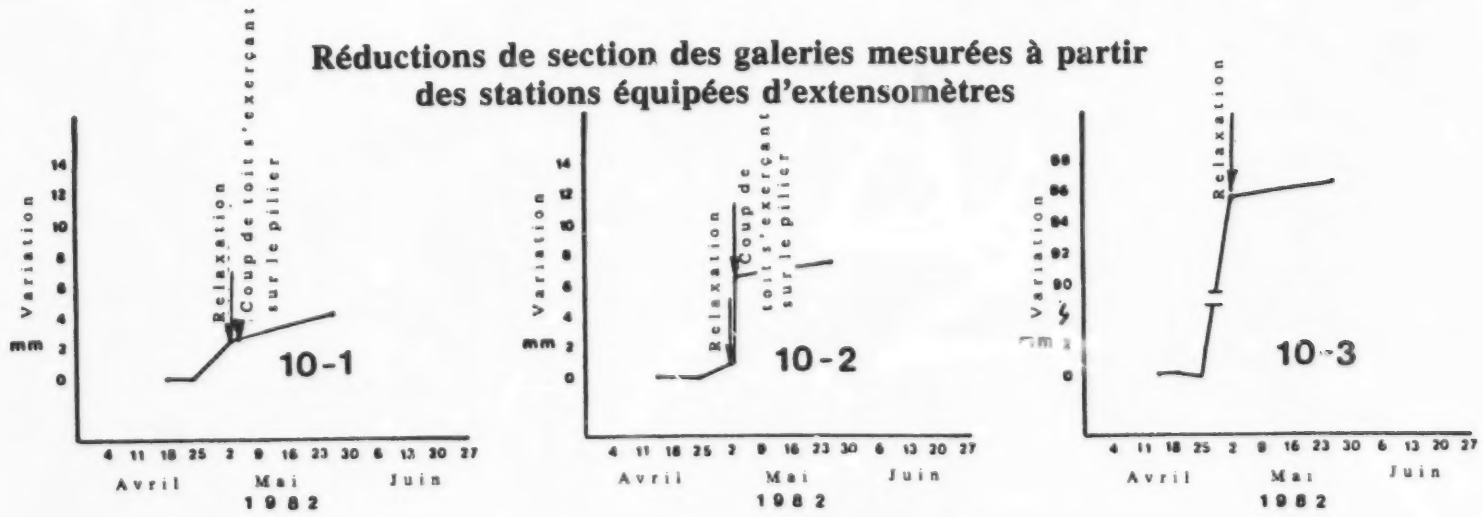


Figure 5 – Relaxation des contraintes dans le pilier de couronne 1102 E. 'B' : disposition des tirs et résultats relatifs à la réduction de section des galeries.

On doit faire passer les contraintes libérées durant le tir de relaxation dans un pilier de culée assez résistant pour supporter la charge supplémentaire. Dans ce cas, le pilier de base de chantier n'a pu soutenir la charge qui lui a été transmise, ou résister à l'onde de choc causée par le coup de toit. Les coups de toit ne sont pas nécessairement précédés d'un bruit microsismique. On a souvent signalé l'existence d'une période de calme ou de 'blocage' avant un coup de toit.

PILIERS DE BASE DE CHANTIER 1421 W – 10 SEPTEMBRE 1982

INFORMATION DE BASE

Les piliers de base de chantier 1421 W se situent dans la zone 'F', qui est une étroite zone du type filon de fissure, contenue dans une andésite. Dans la zone 'F', l'exploitation du minerai a été entièrement pratiquée par la méthode des chambres–magasins avec extraction des piliers de base, les chutes étant disposées à 8 m d'intervalle et une sole de 4 à 6 m laissée en place, comme l'illustrent les figures 6 et 7.

On n'a rencontré aucun problème dans cette zone avant d'entreprendre l'exploitation minière au–dessous du niveau 12. Les parois et les piliers de base de chantier ont commencé à s'effriter et des fissures sont apparues dans les piliers à proximité des chutes. En 1981, on a augmenté l'épaisseur des piliers de sole jusqu'à 8–9 m dans les chantiers exploités en 1981, après la rupture d'un pilier de base au niveau 11. Au début de 1982, l'exploitation du niveau 14 tirait à sa fin à l'extrémité est, mais démarrait seulement à l'ouest. On avait exploité à 50 % les chantiers du niveau 15 à l'est, mais seulement commencé les travaux à l'ouest. À ce moment–là, on a noté que 6 piliers de base de 1421 W se détérioraient beaucoup plus rapidement que ceux situés de part et d'autre de cette section. Les piliers se trouvent dans une zone de blocs faillés, et pour cette raison, on estime que les contraintes y sont beaucoup plus concentrées. Ce secteur étant le principal accès aux chantiers ouest de la zone 'F', on a décidé de soumettre ces piliers à des tirs de relaxation.

PRÉPARATION

On a envoyé une équipe chargée de la remise en état des chantiers, pour effectuer des boulonnages à l'aide de boulons d'ancrage mécanique. On a évité d'utiliser des boulons scellés à la résine et des treillis, étant donné qu'après les tirs, il faudrait procéder à d'importantes réparations.

On a adopté la configuration indiquée à la figure 7 pour les tirs de relaxation, de sorte que la partie centrale et la partie supérieure du pilier de base de chantier soient frappées le plus fortement, en évitant que l'extrados ne soit abattu. On a chargé les trous avec du nitrate–fuel (Anfo), et effectué l'allumage avec des nonels et une ligne double 'B'.

MÉTHODES DE MESURE

On a installé six stations équipées d'extensomètres à ruban dans les parois à 1,2 m au–dessus de la hauteur des rails.

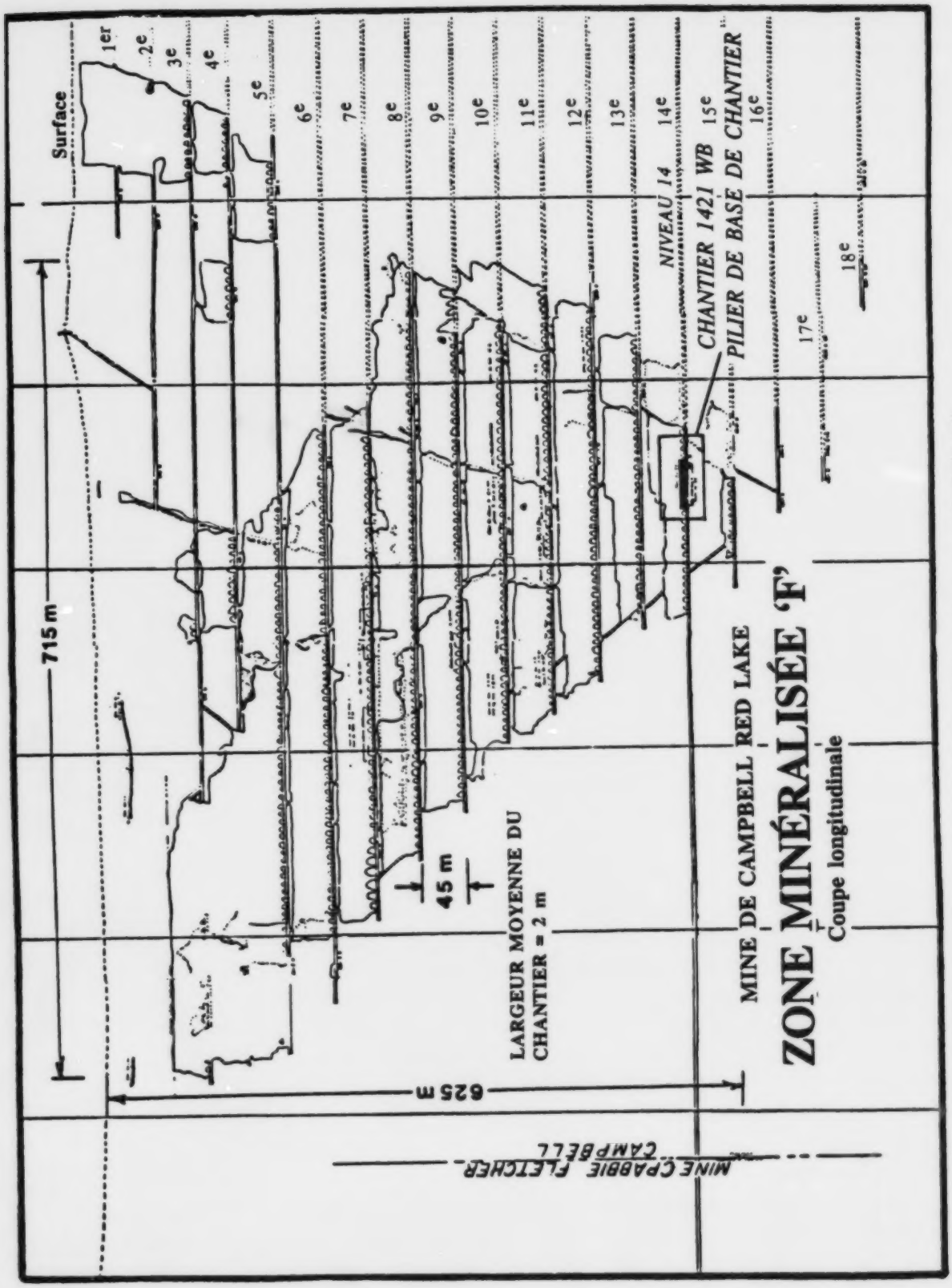


Figure 6 – Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'F'

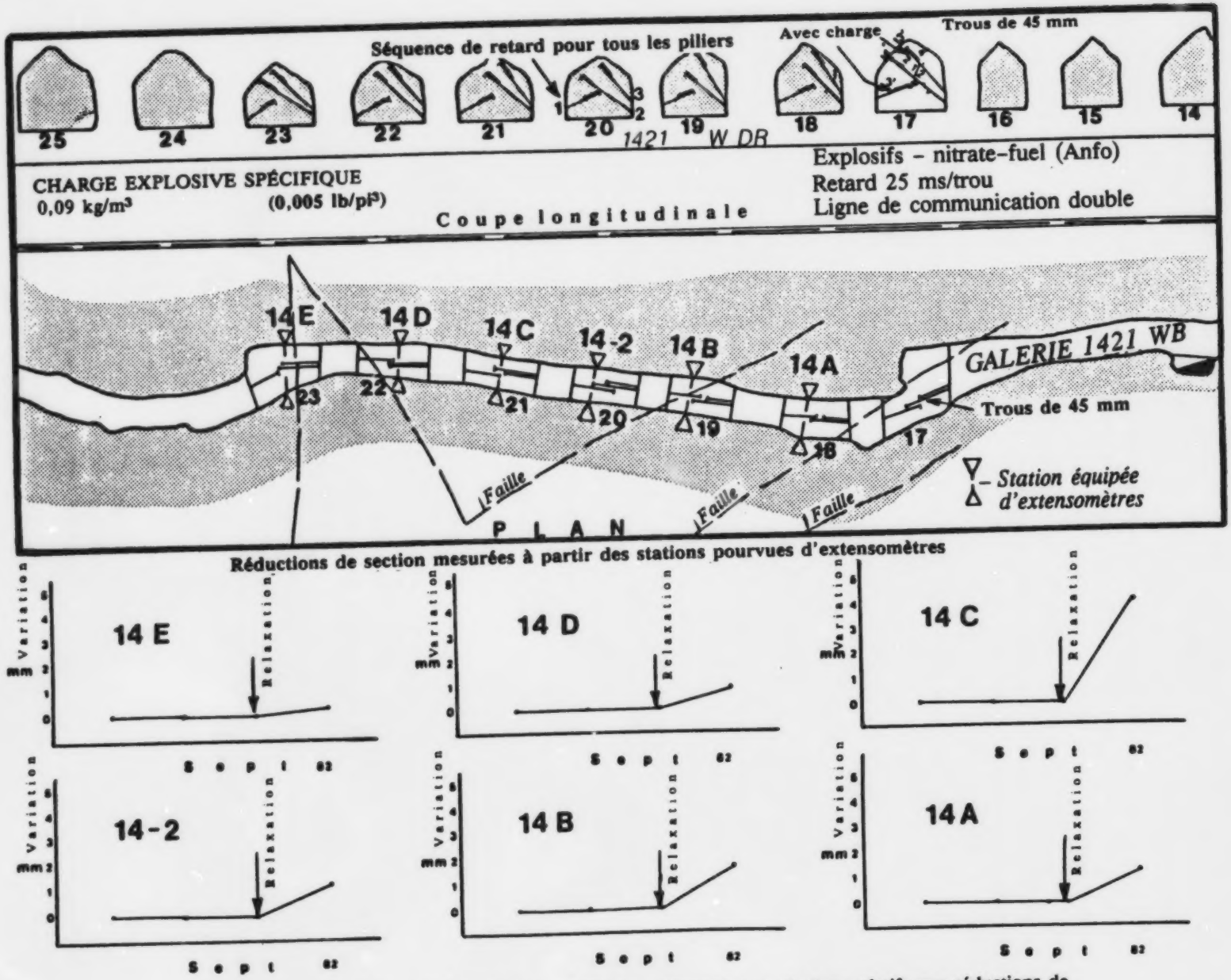


Figure 7 – Relaxation des piliers de base 1421 W : disposition et résultats relatifs aux réductions de section des galeries

RÉSULTATS

Après le tir, aucune activité sismique n'a été perçue en surface. On a inspecté la zone une semaine plus tard, et à l'exception du pilier plus petit où se trouvait la galerie de circulation du chantier, on a observé peu de dommages. Les piliers de base de chantier situés de part et d'autre de la section où ont eu lieu les tirs de relaxation, ont été soumis à un très faible surcroît de pression, et l'on pense que le grand pilier du dessous a supporté la charge.

Plusieurs jours après l'inspection, ont eu lieu plusieurs coups de toit aux niveaux 10 et 11 de la zone 'F'. On a alors décidé d'interrompre tous les travaux d'exploitation minière dans cette zone, et interdit l'accès de la partie soumise aux tirs de relaxation. En décembre 1983, ont eu lieu de sérieux coups de toit dans les niveaux supérieurs de la zone 'F', et plusieurs piliers de base situés au niveau 14 se sont rompus, y compris l'un de ceux qui avaient fait l'objet de tirs de relaxation (les coups de toit ont été localisés à l'aide du système d'observation microsismique).

OBSERVATIONS

À la suite de la modélisation informatisée de la géométrie de la zone 'F', on a noté des niveaux élevés de contraintes dans ces piliers de base avant les tirs de relaxation. Par ailleurs, les contraintes que subissent les piliers de base de chantier dépendent davantage de l'extraction effectuée au-dessus, que de la dimension du pilier au-dessous du niveau. C'est ce que l'on a démontré dans une autre zone du même type, où le sol est solide au-dessous du niveau 15, et où un pilier de base de chantier a subi une rupture au même niveau.

On n'a pas étudié davantage l'influence des failles sur les contraintes subies par les piliers de base, mais on estime que ces contraintes étaient supérieures à la normale, à cause des failles en question. On a observé dans toutes les stations une réduction de section, ce qui indique certains degrés de relaxation des contraintes. Toutefois, le coup de toit ultérieur prouve qu'au moins l'un des piliers de base de chantier est resté intact.

PILIER DE COURONNE 1902 E. – PILIER DE SOLE 1802 – 20 JANVIER 1984

INFORMATION DE BASE

La relaxation des contraintes a eu lieu dans ce pilier à l'intérieur de la zone 'A' près de la paroi de séparation commune avec les mines Dickenson, comme l'indique la figure 4. En raison des coups de toit subis dans cette zone aux niveaux supérieurs, les responsables de la mine de Campbell Red Lake ont adopté une géométrie d'exploitation avec progression en gradins, comme l'avait suggéré le professeur Morrison en 1961. On a commencé l'exploitation minière à l'extrémité est inférieure de la zone minéralisée, et extrait le minerai par la méthode des tranches montantes remblayées, avec petits blocs de 40 m. On a exploité quatre petites sections situées contre la paroi de séparation, à travers le niveau, et l'on n'a rencontré que des difficultés mineures. La longueur de ces chantiers a très fortement ralenti l'exploitation, et par conséquent, on a prolongé la longueur des chantiers en question jusqu'à 80 m. Lorsque le chantier 1902 E. 'C' s'est trouvé à 6 m ou moins du niveau, on a décidé d'effectuer un tir de relaxation. Pour cela, on s'est basé sur les rapports concernant le 'terrain

d'exploitation', sur les inspections visuelles, et pour la première fois, sur l'augmentation de l'activité microsismique enregistrée.

PRÉPARATION

Au niveau 18, on a rénové la galerie en employant des barres nervurées de 1,8 m et 2,4 m, en résine, sur les parois et extrados, ainsi qu'un treillis à mailles soudées. Initialement, on devait forer tous les trous, de diamètre 54 mm, à partir du niveau 18, en employant une perceuse de longs trous. On a modifié les plans et ajusté l'espacement pour conserver la même charge spécifique théorique, lorsque l'on a foré des trous remontants de 44 mm à partir du niveau 18 et de l'intérieur du chantier 1902 E., comme l'indique la figure 8. Étant donné que l'on devait effectuer l'extraction à partir du niveau 18 en employant une méthode de défonçage, on a fermé le chantier et on l'a remblayé de façon compacte.

MÉTHODES DE MESURE

a) On a placé un réseau serré de géophones autour des piliers, de façon à enregistrer l'activité sismique avant et après le tir.

b) On a employé un magnétophone à cassettes pour enregistrer le tir à partir du géophone le plus rapproché.

c) On a employé un moniteur microsismique portable de type Electro–Lab, pour effectuer le comptage des petits épisodes sismiques d'échelle locale.

d) Pour mesurer la réduction de section, on a établi le long de la galerie au niveau 18 des points d'application de l'extensomètre à ruban.

e) On a employé un oscillographe pour enregistrer les formes d'ondes sismiques.

RÉSULTATS

On a enregistré au moyen du système microsismique le tir de relaxation, lequel a été suivi de nombreux épisodes sismiques de petite envergure et de bruits audibles pendant environ 1/2 min. Un coup de toit est ensuite survenu dans le pilier supérieur, mettant hors d'usage le géophone le plus proche. L'activité microsismique a diminué au cours des quelques heures suivantes, à mesure que les piliers se stabilisaient.

Une inspection effectuée au niveau 18 a montré que l'extrados avait subi des dommages notables, et que plus de 30 cm de débris recouvraient le plancher de la galerie. Pour cette raison, et parce qu'il était impossible de pénétrer sur le chantier, on n'a pu déterminer l'état du pilier situé au–dessous. Les parois étaient en état assez satisfaisant, et l'on a pu effectuer des mesures sur les pointes de l'extensomètre.

Les travaux de rénovation ont consisté à replacer des boulons d'ancrage et à installer un blindage avec maillons de chaîne. Les boulons d'ancrage scellés à la résine ont parfaitement retenu le terrain fissuré.

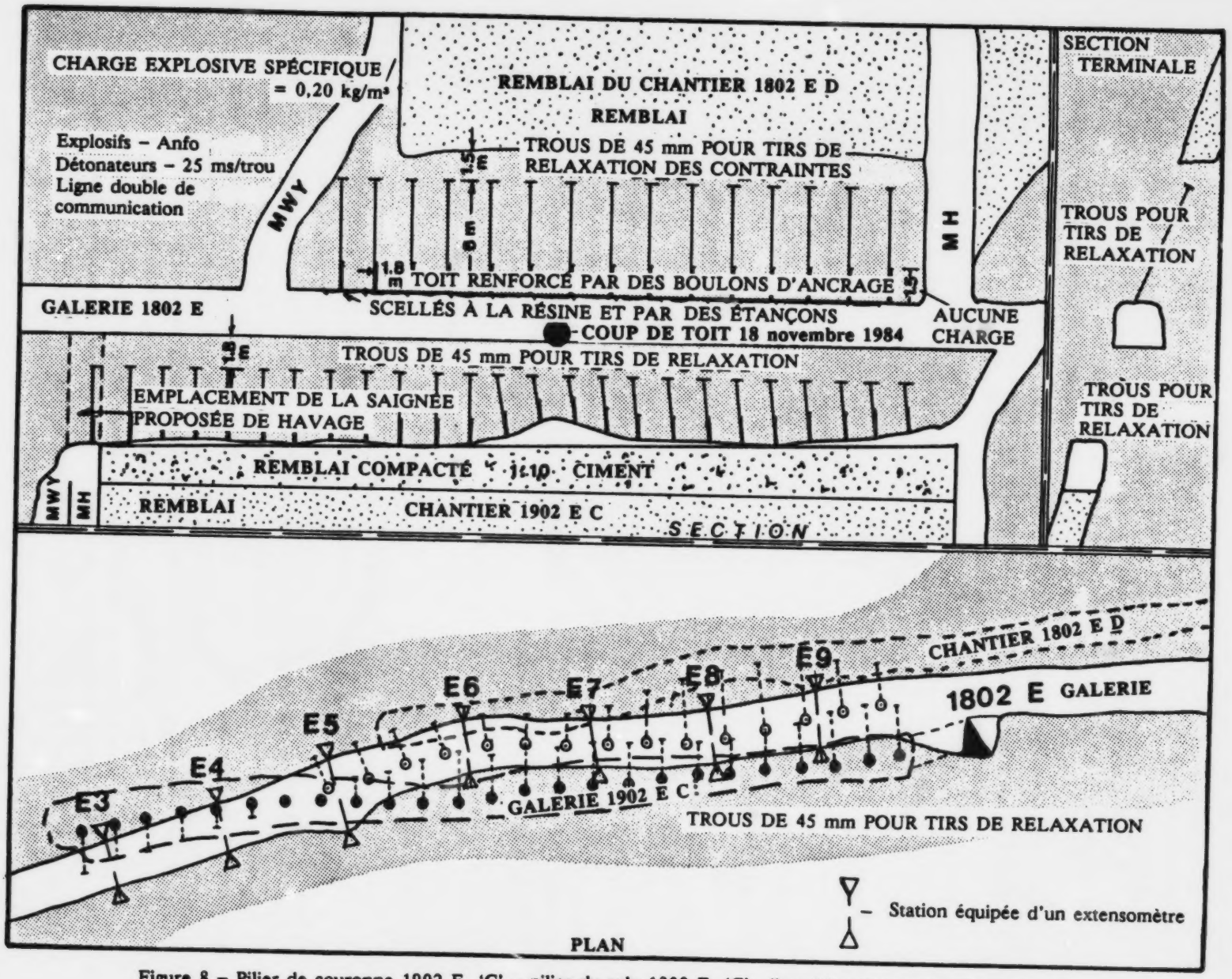


Figure 8 – Pilier de couronne 1902 E. 'C' – pilier de sole 1802 E. 'C'; disposition des tirs de relaxation

On a foré une saignée dans la galerie auxiliaire existante de l'extrémité ouest et commencé le défonçage. Il est rapidement apparu que le pilier du dessous était fortement fissuré et fragmenté, ce qui rendait le forage difficile. Après un tir de production, est survenu un petit coup de toit dans le pilier directement au-dessus du niveau 18, qui a endommagé le blindage. On a réparé celui-ci et extrait le reste sans autre incident. Bien que l'on ait relaxé les contraintes, on n'a pas extrait le pilier supérieur, étant donné qu'au-dessus, ne se trouvait que du remblai non consolidé.

OBSERVATIONS

Actuellement, on ne chercherait jamais à effectuer des tirs de relaxation dans la mine de Campbell Red Lake, sans utiliser un système microsismique central. Étant donné que l'on peut localiser les épisodes microsismiques et percevoir l'activité à partir d'un lieu distant, il nous est possible de mieux comprendre le comportement de la roche. Les données microsismiques nous indiquent aussi quel est le moment opportun pour inspecter la zone.

On a estimé que ceci a été l'essai de relaxation des contraintes le plus concluant. Le fait que deux faibles coups de toit ont eu lieu dans les piliers après les tirs de relaxation et de production indiquent qu'un fort coup de toit serait survenu, si l'énergie n'avait pas été partiellement libérée par les tirs de relaxation.

On a utilisé le système Electro-Lab portable, appareil microsismique à voie unique, avant et après le tir de relaxation, pour effectuer le comptage des épisodes sismiques faibles survenant à proximité des piliers. Ces secousses sismiques n'ont pas été assez importantes pour être enregistrées par le système central, mais nous ont renseignés sur l'activité locale. Ce système se compose d'un compteur à secousses, à piles, équipé d'un registre d'horloge, d'une mémoire et d'un système d'ajustement du seuil. Le mineur doit mettre le système en position de déclenchement automatique, et enregistrer les épisodes sismiques pendant 2 heures durant l'intervalle de repos entre les postes de travail. À son retour, il doit noter le nombre de secousses enregistrées, pour les communiquer à l'ingénieur spécialiste de la mécanique des roches. Non seulement ce système a donné aux mineurs un peu plus de confiance, mais il leur a donné le sentiment de participer davantage au projet.

CONCLUSIONS

La relaxation des piliers est un procédé très lent et coûteux, dont les résultats ne sont pas entièrement prévisibles. Pour mieux évaluer les résultats, on cherche à mesurer avec des appareils ces tirs de relaxation, en faisant appel à toute la technologie disponible.

Les tirs de relaxation ne sont pas une méthode nouvelle dans les terrains sujets aux coups de toit. Il semble que chaque mine ait adopté une méthode d'approximations successives pour obtenir des résultats qui paraissent cohérents. La meilleure façon de résumer l'opinion générale exprimée par les employés de la mine de Campbell Red Lake à propos de la relaxation des contraintes, est de citer un rapport documentaire réalisé en 1980 par Dimitrios C. Frantzos (5).

"Il est impossible d'évaluer, mais injuste d'ignorer l'effet psychologique des tirs de relaxation; surtout parce qu'il y a eu une longue période de succès apparent. On doit accepter le terme de "succès apparent", parce que, même si la décision de procéder aux tirs de relaxation n'est pas prise à la légère, on ne peut garantir que cette décision est correcte. Les tirs une fois effectués, on ne peut prouver que le chantier aurait subi un coup de toit si l'on n'avait pas procédé à la relaxation des contraintes."

BIBLIOGRAPHIE

1. Blake, W. "Destressing test at the Galena Mine, Wallace, Idaho", Trans. AIME, mars 1971.

2. Blake, W. "Rockburst mechanics", Colorado Schoool of Mines Quarterly, vol. 67, n° 1, 1972.

3. Hedley, D.G.F. et Wetmiller, R.J. "Rockbursts in Ontario mines"; rapport spécial SP 85–5, CANMET, Énergie, Mines et Ressources Canada; 1985.

4. Morrison, R.G.K. "A report on rockburst potentiality at Dickenson Mines Limited and Campbell Red Lake Mines Limited"; rapport des experts–conseils, 1961.

5. Frantzos, D.C. "Rockburst – a report on preliminary literature survey", Sudbury, 1980.

PARTIE 3 : TIRS DE RELAXATION EFFECTUÉS DANS LE PILIER DE COURONNE 1604 E, MESURÉS AU MOYEN D'INSTRUMENTS

INTRODUCTION

Le chantier 1604 EW fait partie de la zone minéralisée A–1 de la mine Campbell. Dans cette zone, l'exploitation minière a lieu du niveau 13 au niveau 18 (horizons 550 à 800 m), comme l'indique la coupe longitudinale présentée à la figure 9. On effectue le dépilage à des intervalles de niveaux de 45 m, et les chantiers d'abattage sont assez étroits (1,8 m de large), et suivent le réseau filonien en direction, sur 150 à 180 m.

On a commencé les travaux d'exploitation du chantier en 1975 en abattant les extrados au niveau 16 jusqu'à une hauteur de 3 m. On a placé des goyots à des intervalles de 35 m, et l'on a déversé du remblai en ciment de façon à constituer un bouchon dans la sole. On a employé la méthode d'exploitation par tranches montantes remblayées et gradins renversés, pour exploiter le minerai sur toute sa longueur, à des intervalles de niveau de 2,5 m, jusqu'à 10 m au moins du niveau 15. En même temps, on a réalisé un dépilage similaire dans le chantier 1504 EW jusqu'au niveau 14.

Lorsque l'extrados du chantier s'est rapproché à 10 m ou moins du niveau 15, on a estimé qu'il fallait procéder à la relaxation de la section centrale du pilier, et l'extraire en premier. Le long de la section centrale du chantier, on avait extrait dans le mur, à partir du filon principal, deux apophyses. On a désigné le filon principal par le terme de filon 'A', les apophyses par les termes de filons 'B' et 'C'. Autrefois, dans la mine Campbell, pour effectuer des tirs de relaxation des contraintes, on avait foré des trous dans le plan du minerai. Les filons se recouvrant partiellement, on a foré les trous pour tirs de relaxation dans le filon 'C', de façon à couvrir à la fois les filons 'A' et 'B'. On a dû procéder à la relaxation d'une partie du filon principal 'A' à partir de l'intersection du filon 'C' avec le remontage du chantier, de la façon traditionnelle, comme indiqué à la figure 10.

On a utilisé une perceuse de longs trous, pour forer des trous de 4,5 cm à des intervalles de 1,4 m en même temps que des trous obliques forés à l'ouest à partir de l'extrémité du filon 'C'. On a employé pour les tirs de relaxation une charge spécifique de 0,704 kg/m^3, comparativement à 2,1 kg/m^3 dans le cas des tirs habituels de production. Pour procéder à la relaxation des contraintes on a chargé tous les trous forés avec du nitrate–fuel (ANFO) jusqu'à 1,5 m de la base des trous; on les a remplis avec une double cartouche de type NONELS à retard 'O' et on a effectué l'allumage avec un double PRIMACORD.

SÉQUENCE PRÉVUE D'EXTRACTION APRÈS LES TIRS DE RELAXATION, DANS LE CAS DU PILIER DE COURONNE 1604 E

On a creusé une sous–galerie à partir de la galerie 1504 au–dessus du puits auxiliaire dans le filon 'B', et l'on a percé une entaille pour l'intersecter avant d'effectuer le tir de relaxation. On a creusé une autre entaille dans le filon 'A' au–dessus du goyot n° 3 et jusqu'au bouchon de ciment, au niveau 15. Après le tir de relaxation, on devra abattre une série de fronts de taille de 9 m de haut et 2,5 m de long dans le filon 'B', jusqu'à ce que ce filon recoupe le filon 'A'. Le filon 'B'

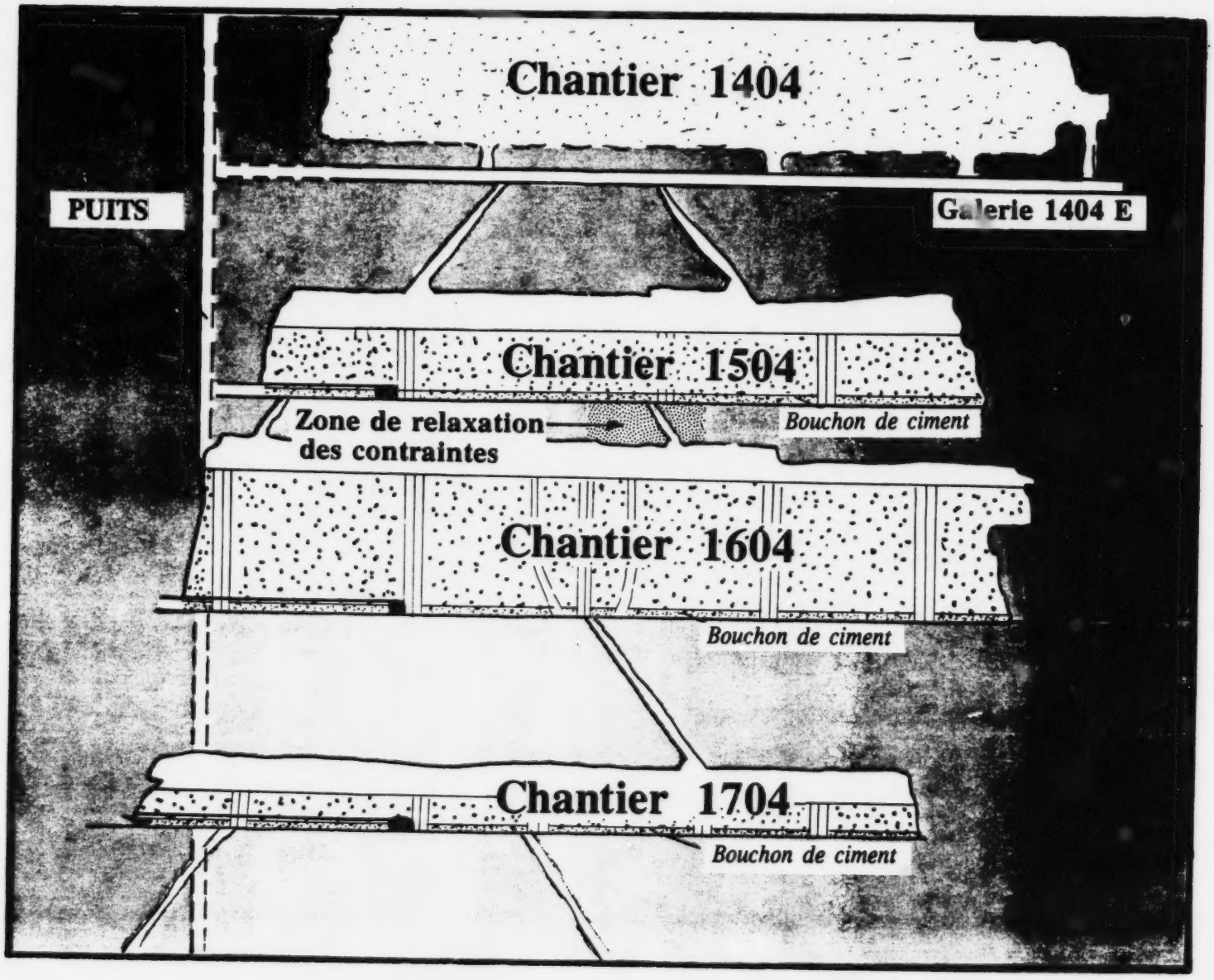


Figure 9 – Coupe longitudinale de la zone minéralisée 'A–1'

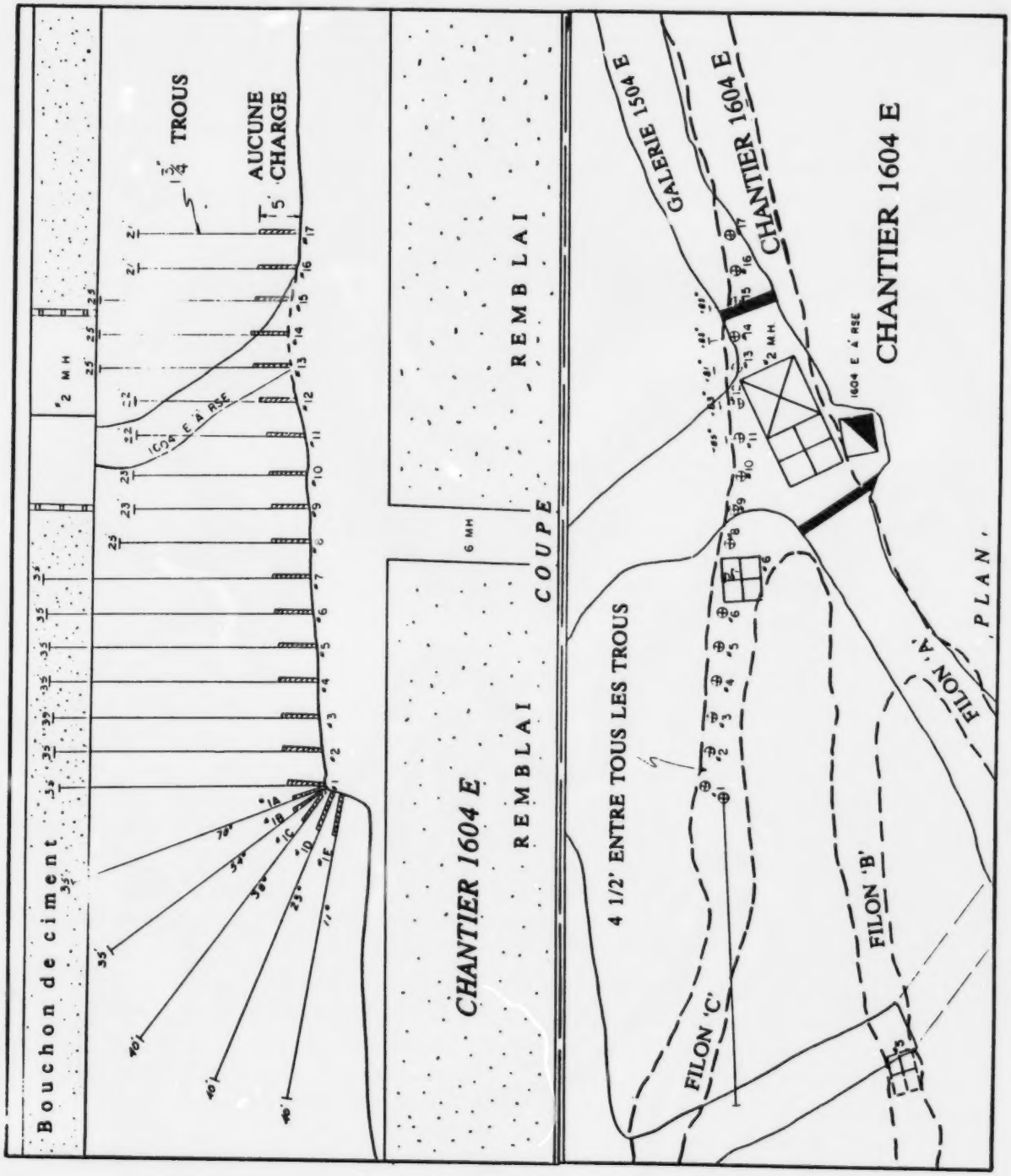


Figure 10 – Disposition des tirs de relaxation effectués dans le chantier 1604 E

doit se trouver dans 'l'ombre' du filon 'C' à l'intérieur duquel les contraintes ont été relaxées, et se prolonger au-delà du niveau 15, jusqu'à l'endroit où l'on avait découvert le filon et pratiqué l'extraction du minerai dans le chantier 1504 E (voyez la figure 10). Avant d'exploiter le filon 'B' au-delà de ce niveau, on doit creuser une sous-galerie de façon à recouper l'entaille pratiquée dans le filon 'A'. Lorsque l'exploitation du filon 'B' sera terminée, on poursuivra l'exploitation du filon 'A', à partir de l'entaille pratiquée au-dessus du goyot 3, de la même manière, en employant des fronts de taille de 30 pi de haut. Une fois l'extraction complétée au-delà d'une trémie, on comblera cette section avec un remblai compact. De cette façon, à tout moment, on ne laissera dégagé qu'un maximum de 120 pi des chantiers d'extraction.

MÉTHODES DE MESURE

Pour mesurer les effets des tirs de relaxation sur les propriétés in situ de la roche et sur les contraintes qui s'exercent dans le pilier de couronne 1604 E, on a installé des instruments de mesure dans toute la région soumise aux tirs de relaxation, de façon à évaluer :

- le bruit ou l'activité microsismique associés à la redistribution des contraintes à l'intérieur de la région du pilier;
- les variations des contraintes à l'intérieur du pilier de couronne du filon 'A';
- la vitesse maximum de propagation durant le tir de relaxation, et tout épisode sismique connexe;
- la réduction de section des galeries de mine;
- le déplacement de la charge dans le remblai du chantier.

La mine de Campbell Red Lake utilise un système microsismique de surveillance à 48 voies, du type Electro-Lab MP-250. Le système MP-250 est un système à microprocesseur, conçu pour déceler et localiser les sources d'activité sismique (bruits) souterraine. Ce système mesure la différence entre les temps d'arrivée d'un signal sismique jusqu'à des géophones placés en série à l'intérieur d'un réseau sismique. Si l'on connaît l'emplacement de chaque géophone et la vitesse de propagation des ondes sismiques, on peut estimer l'emplacement de la source des phénomènes sismiques. La figure 11 montre la disposition du groupe de géophones, projetée au niveau 15.

Pour observer le tir de relaxation effectué sur le pilier de couronne 1604 E, on a installé 9 géophones dans toute la zone 'A-1', disposés selon un groupement. Ceci a permis d'améliorer à la fois la détection des bruits sismiques et la capacité de localisation des sources dans la zone soumise aux tirs de relaxation.

On a aussi employé un système d'enregistrement des formes d'ondes, du type Gould DASA 9000, à 8 voies. On a introduit en parallèle, à la fois dans les systèmes Gould et MP-250, les signaux provenant de 8 des géophones souterrains. On a ainsi employé le système Gould pour compléter les données fournies par le système MP-250 tout en obtenant des mesures précises des vitesses des ondes 'P' et 'S', pour localiser avec plus de précision les sources d'ondes sismiques, et pour vérifier l'installation des géophones.

Pour mesurer les vitesses maxima des particules, on a installé trois moniteurs des vibrations produites par des tirs, du type Instantel DS-377, à des distances sélectionnées des tirs de relaxation, comme indiqué à la figure 11.

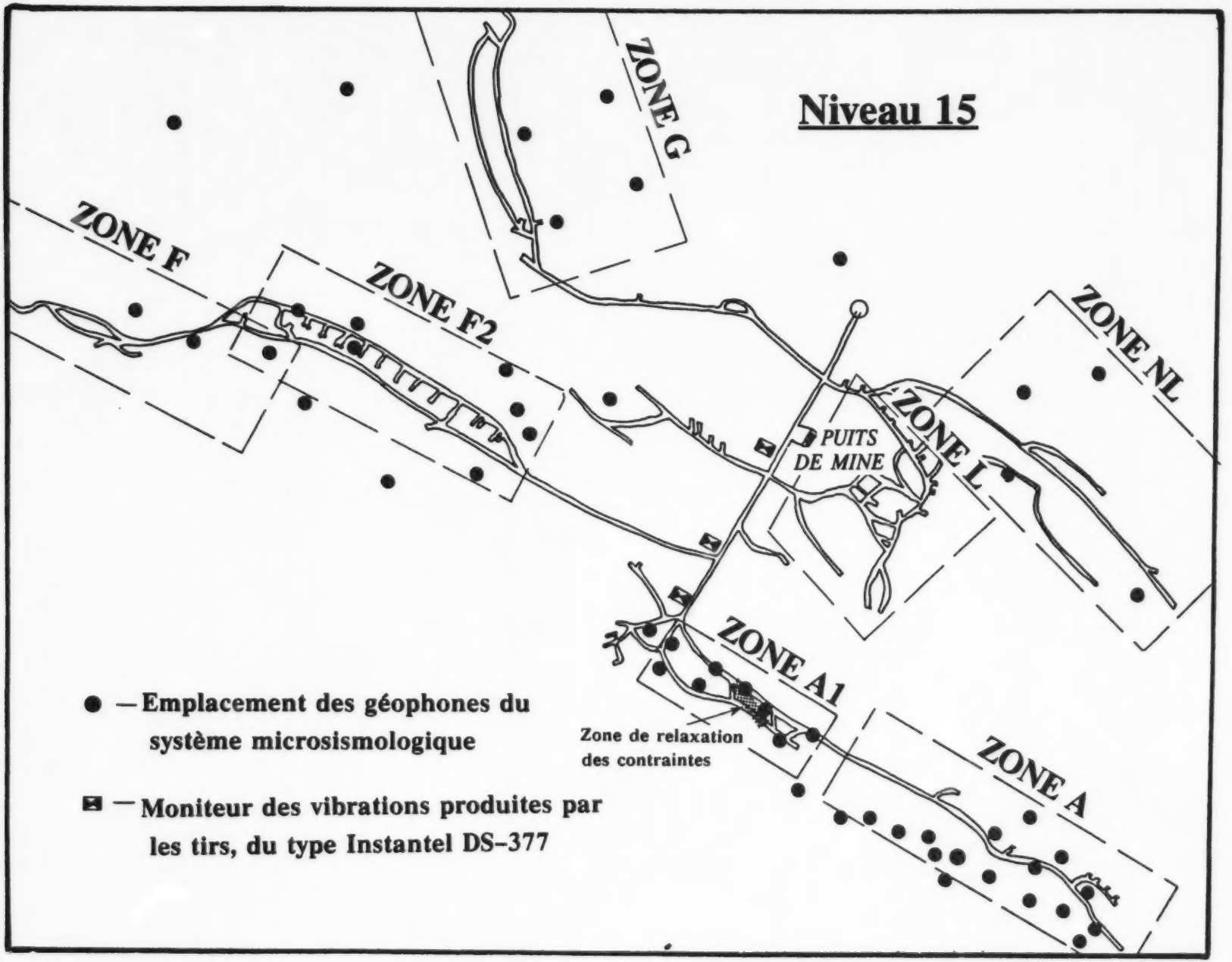


Figure 11 – Disposition du réseau de géophones dans la mine Campbell

On a installé dans les trous de forage au diamant EX, pratiqués dans les piliers de couronne du filon 'A', sept appareils de mesure des contraintes, à corde vibrante. En même temps que ces appareils de mesure, on a installé douze stations équipées d'extensomètres à ruban à l'intérieur du filon 'A', pour mesurer la convergence du mur et du toit. Finalement, on a placé dans le remblai déjà coulé une jauge plate pneumatique de pression, pour mesurer tout déplacement éventuel des charges dans le remblai. La figure 12 montre l'emplacement des appareils de mesure des contraintes, des extensomètres et des jauges de pression installés dans le remblai.

MODÉLISATION INFORMATISÉE

Pour mieux calculer les effets des tirs de relaxation sur les contraintes qui s'exercent dans les piliers et sur la réduction de section des chantiers, on a employé à la fois le modèle NFOLD de discontinuité des déplacements et le modèle d'éléments finis, pour simuler les tirs de relaxation.

Les conditions limites applicables à cette simulation modélisée de la géométrie des chantiers d'exploitation de la zone 'A–1' étaient :

Contrainte horizontale/verticale	= 1,7
Module d'élasticité de la roche	= 80,0 GPa
Coefficient de Poisson de la roche	= 0,21
Coefficient de tassement	= 7,0 MPa

La figure 13a indique la structure de l'exploitation minière telle que présentée dans le modèle NFOLD. La géométrie des chantiers figurant dans le modèle comprend la zone 'A–1' entre les horizons 550 m et 730 m. La largeur d'exploitation est de 2 m, avec trois couches parallèles de pendage à 75°. La couche qui constitue le filon 'A' est la principale zone d'abattage; les filons 'B' et 'C' se situent au mur à 7,5 m et 12 m respectivement, (voyez la figure 13b).

On a réalisé au total trois séries d'essais d'exploitation dans la mine, pour simuler la relaxation des contraintes, portant sur :

1. La géométrie actuelle de l'exploitation minière – conditions élastiques.
2. La simulation de la relaxation des contraintes, par réduction du module de la roche de 25 % dans la zone de relaxation des contraintes.
3. La simulation de la relaxation par réduction du module de la roche de 50 % dans la zone de relaxation des contraintes.

La figure 14 est une carte en courbes de niveau montrant les contraintes normales dans cette zone d'exploitation minière. Les contraintes moyennes s'exerçant sur les piliers de couronne se situent approximativement entre 90 et 100 MPa. Dans la partie centrale du filon A, l'exploitation au mur des filons 'B' et 'C' protège partiellement le pilier de couronne en réduisant de 5 à 10 % les contraintes s'exerçant sur ce pilier. D'après ces détails, on voit que les contraintes qui s'exercent sur le pilier de couronne 1604 ont atteint des niveaux critiques, ce qui indique le besoin d'appliquer des méthodes minières palliatives ou de procéder à la relaxation des contraintes.

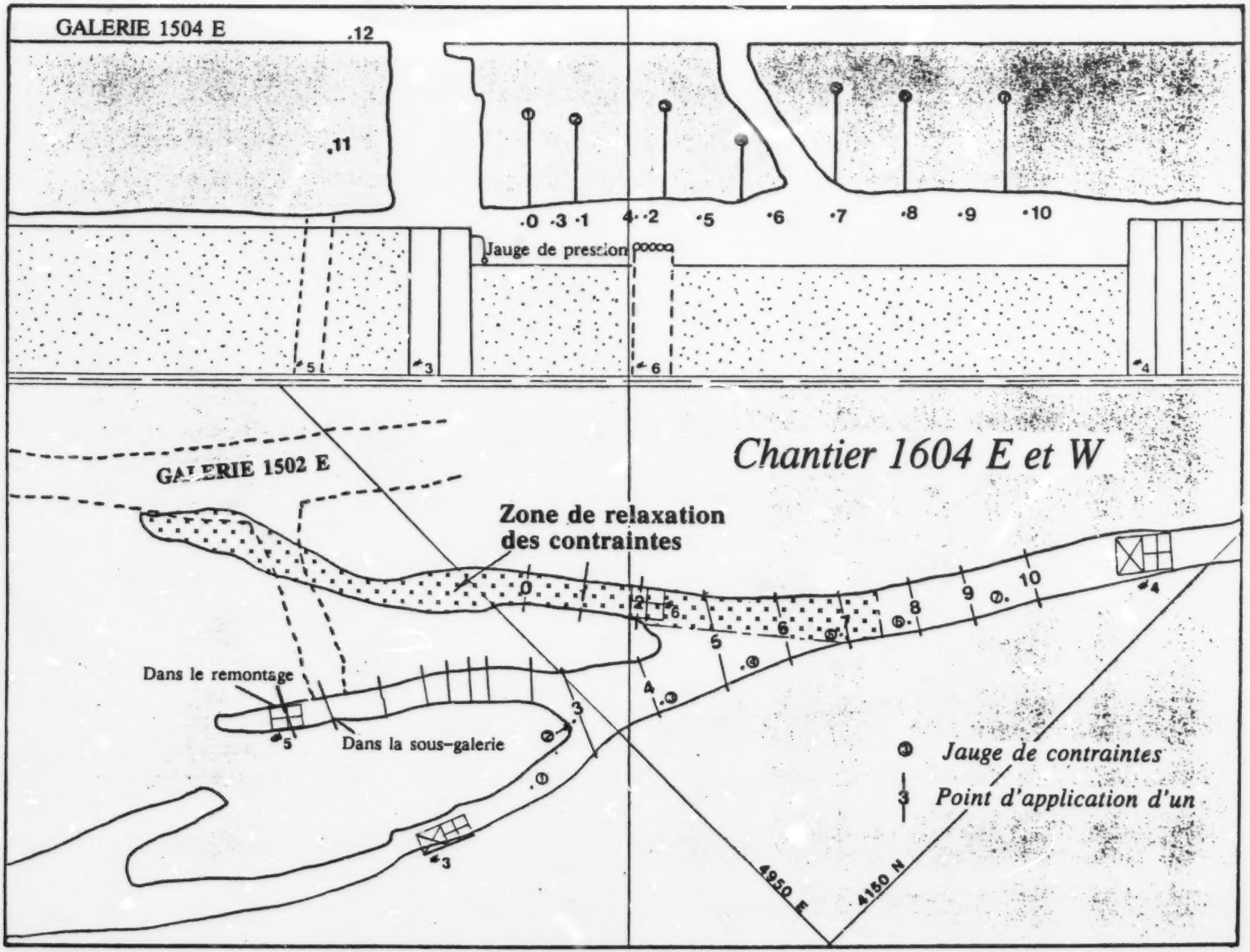
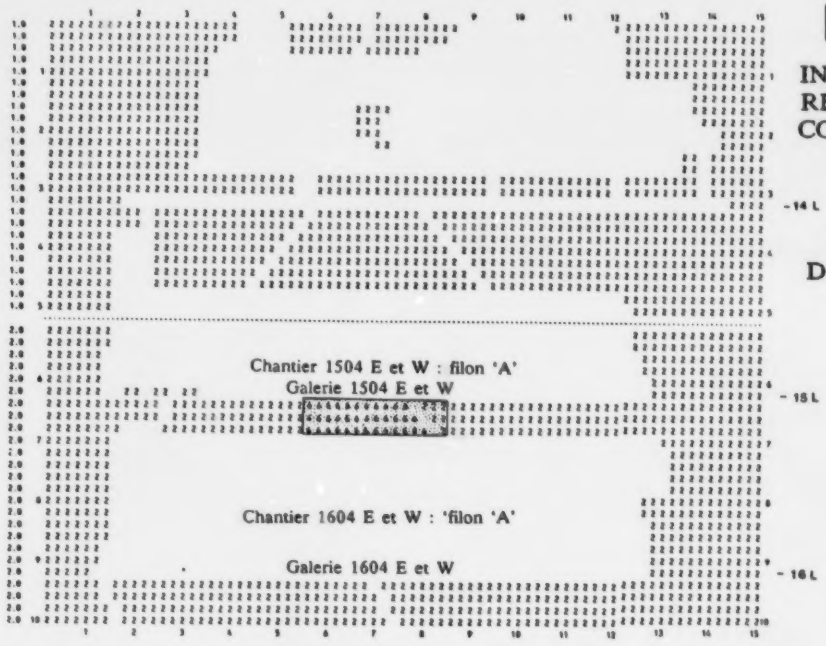


Figure 12 – Disposition des instruments de mesure aux alentours du chantier 1604

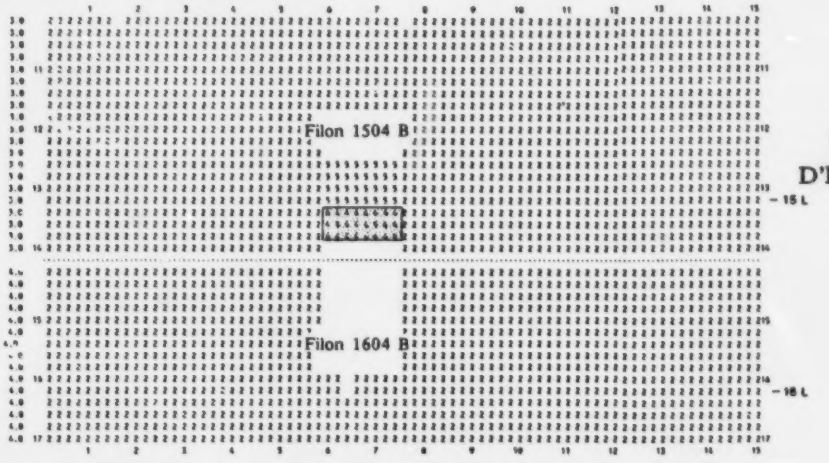
Mine de Campbell Red Lake Analyse d'un essai simulé de relaxation des contraintes dans la zone minéralisée 'A-1' -

Structure d'exploitation du filon 'A' Facteur = 1.0000 Longueur en direction des éléments = 3.040



Mine de Campbell Red Lake : Analyse des essais simulés de relaxation des contraintes dans la zone minéralisée 'A-1' : chantier 1604 E et W

Structure d'exploitation du filon 'B' Facteur = 1.0000 Longueur en direction des éléments = 3.040



Mine de Campbell Red Lake : analyse des essais simulés de relaxation des contraintes dans la zone minéralisée 'A-1' - Chantier 1604 E et W

Structure d'exploitation du filon 'C' Facteur = 1.0000 Longueur en direction des éléments = 3.040

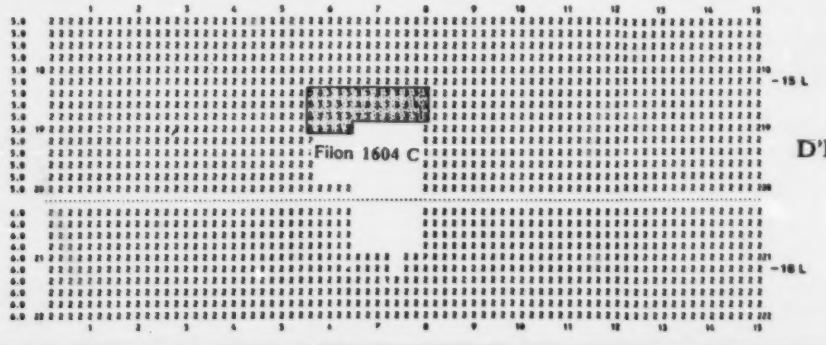


Figure 13a - Plan d'exploitation minière des filons A, B et C, selon le modèle informatisé

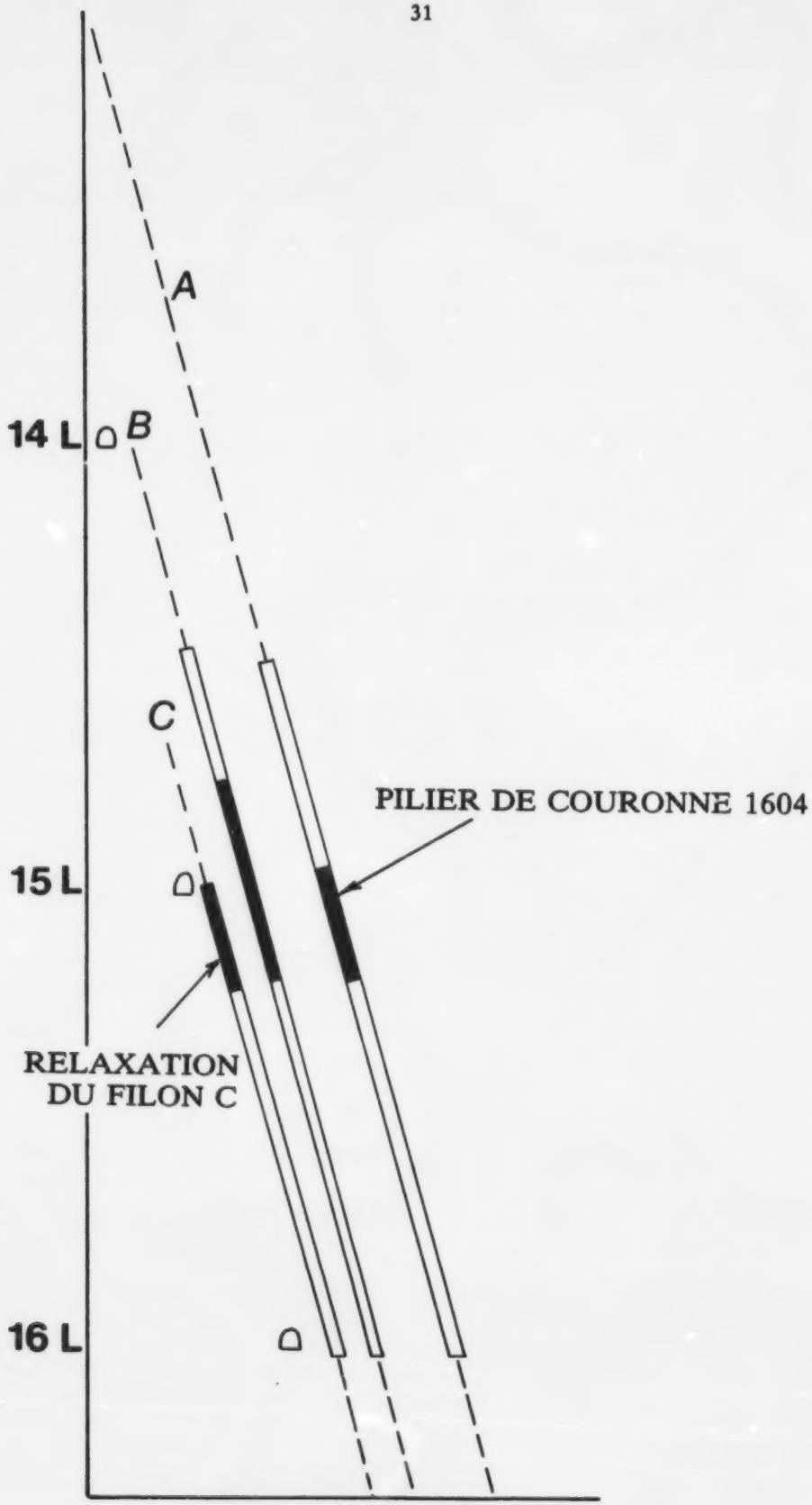


Figure 13b – Coupe montrant les filons A, B et C

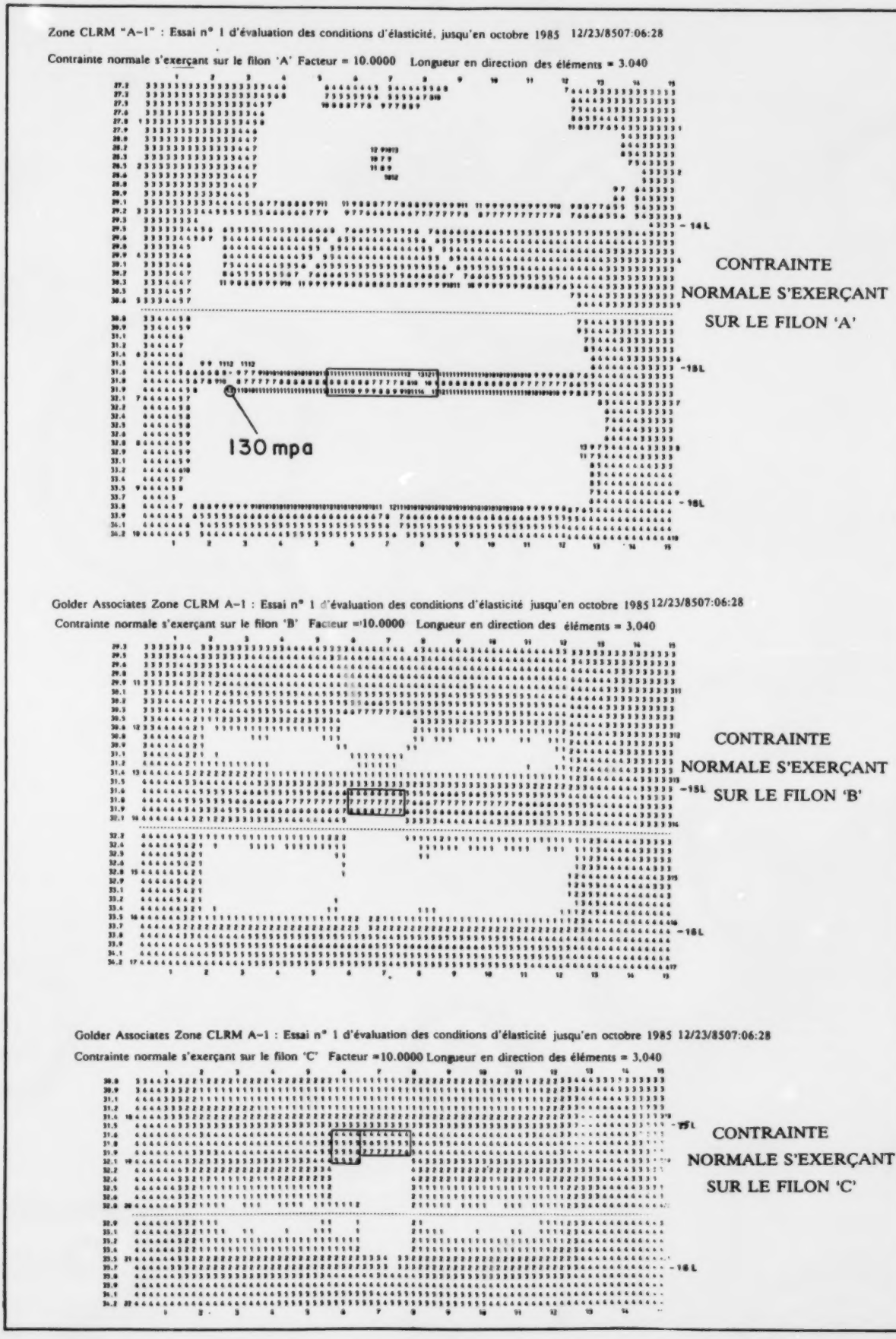


Figure 14 – Distribution des contraintes normales dans des conditions d'élasticité

RÉSULTATS DES ESSAIS IN SITU

Le tableau 1 indique les mesures réelles des réductions de section des galeries et celles des contraintes comparativement aux résultats calculés d'après la modélisation numérique.

Tableau 1 – Variations mesurées et calculées des contraintes et des réductions de section

Section	Variation mesurée	Variation calculée	
		Réduction de 25 % du module	Réduction de 50 % du module
EX–2	–2,89 mm	–0,67 mm	–2,06 mm
EX–4	–0,51 mm	+0,13 mm	+0,45 mm
EX–5	–1,41 mm	–1,03 mm	–1,90 mm
Contraintes–3	–0,77 MPa	–0,70 MPa	–2,10 MPa
Contraintes–5	–5,50 MPa	–1,80 MPa	–5,60 MPa
Contraintes–6	+5,60 MPa	+1,80 MPa	+7,60 MPa

On a déclenché un tir expérimental dans la même zone avant d'effectuer le tir de relaxation des contraintes, de façon à déterminer les vitesses sismiques. En employant la présentation de formes d'onde de Gould, on a pu mesurer avec précision le temps d'arrivée des ondes P et des ondes S et ainsi obtenir les vitesses suivantes :

vitesse des ondes P, 6 327 m/s, vitesse des ondes S, 3 743 m/s

la dispersion étant d'environ 2 %. Le système Electro–Lab MP–250 a indiqué une vitesse légèrement plus basse des ondes P, de 6 215 m/s. Ces valeurs nous donnent un module d'élasticité dynamique de 95 GPa et un coefficient de Poisson de 0,23 chiffre de 10 à 20 % plus élevé que les valeurs statiques employées dans le modèle NFOLD.

Seuls deux des trois moniteurs des vibrations engendrées par les tirs ont enregistré l'explosion. Les vitesses maximales réelles des particules à la suite des tirs se situaient dans les limites de 20 % autour des valeurs calculées.

Tableau 2 – Mesures des vibrations engendrées par les tirs de mine

Station	Distance du tir	Vitesse maximum des particules		
		mesurée	calculée	
IS–1	104 m	32 mm/s	25 mm/s	(80 % de la valeur calculée)
IS–2	81 m	46 mm/s	38 mm/s	(83 % de la valeur calculée)
IS–3	45 m	Non enregistrée	99 mm/s	

On a déterminé les vitesses maximales théoriques des particules d'après la formule de Ambrassey et Hendron appliquée aux charges sphériques :

$$\hat{v} = 2080\left(\frac{R}{W^{1/3}}\right)^{-1,6} \qquad \text{Éq. 3}$$

dans laquelle R = distance du tir en mètres, W charge explosive, exprimée en kilogrammes, par détonateur à retard et $\hat{v}$ est la vitesse maximale des particules exprimée en millimètres/s.

On a installé la jauge de pression dans le remblai, à l'intérieur du filon 'A', afin d'observer tout accroissement de pression lorsque l'exploitation minière a repris dans le filon 'A'. Un accroissement n'était pas prévu, et ne s'est pas produit à la suite du tir de relaxation.

Après le tir, on a enregistré 8 épisodes sismiques au moyen du système d'observation microsismique. Par ailleurs, durant les 10 premières minutes après le tir, on a perçu une activité microsismique de faible énergie avec le moniteur d'un géophone situé à environ 20 mètres du tir de relaxation, au niveau 15. À la figure 15, sont indiqués les endroits où se sont manifestés ces épisodes, tout autour de la zone soumise aux tirs de relaxation.

COMMENTAIRES

Après tous les travaux de préparation et efforts que l'on avait déployés pour mesurer cet essai de relaxation, l'absence d'activité microsismique notable et de coups de toit a été un élément de surprise, compte tenu des résultats donnés par les autres tirs de relaxation qui ont eu dans la mine Campbell. Le chantier était facilement accessible à partir du goyot du niveau 16, et la plupart des instruments de mesure étaient encore en état de fonctionnement. Dans trois des trous pour tirs de relaxation creusés à l'extrémité ouest du filon 'C', les tirs avaient raté, mais par ailleurs, les résultats étaient concluants.

L'activité sismique enregistrée était entièrement confinée à la zone du pilier de couronne du chantier 1604, le long de la culée est où a eu lieu le tir de relaxation. Ceci indique clairement la capacité du tir de relaxation à déplacer une partie de la charge qui était supportée par le pilier de couronne.

Selon les résultats de la modélisation informatisée, les contraintes subies par le pilier à l'intérieur du filon 'C' n'avaient pas atteint un niveau critique. Par conséquent, l'influence du tir de relaxation sur les variations des contraintes subies par le pilier et sur la réduction de section du chantier était moins importante que si le tir de relaxation s'était entièrement produit à l'intérieur du pilier de couronne du filon 'A', soumis à des contraintes plus élevées.

Toutes les données recueillies à partir des jauges de contraintes, des points d'application des extensomètres, et des moniteurs de vibration des tirs, concordaient suffisamment bien avec les résultats théoriques donnés par la modélisation informatisée. Selon cette information, il semblerait que le tir ait réduit le module du pilier de 25 à 50 %.

On a commencé l'exploitation minière dans le filon 'B', en utilisant un front de taille de 3 m de long, sur la hauteur totale du stot jusqu'à l'horizon 15. On n'a rencontré aucun problème de terrain, et l'on a complété l'exploitation du filon 'B'. On poursuivra l'exploitation minière au-dessus du niveau 15 en procédant à des extractions sur 3 m de haut au moyen de forages remontants, jusqu'à ce que l'on atteigne l'horizon du chantier 1504 E.

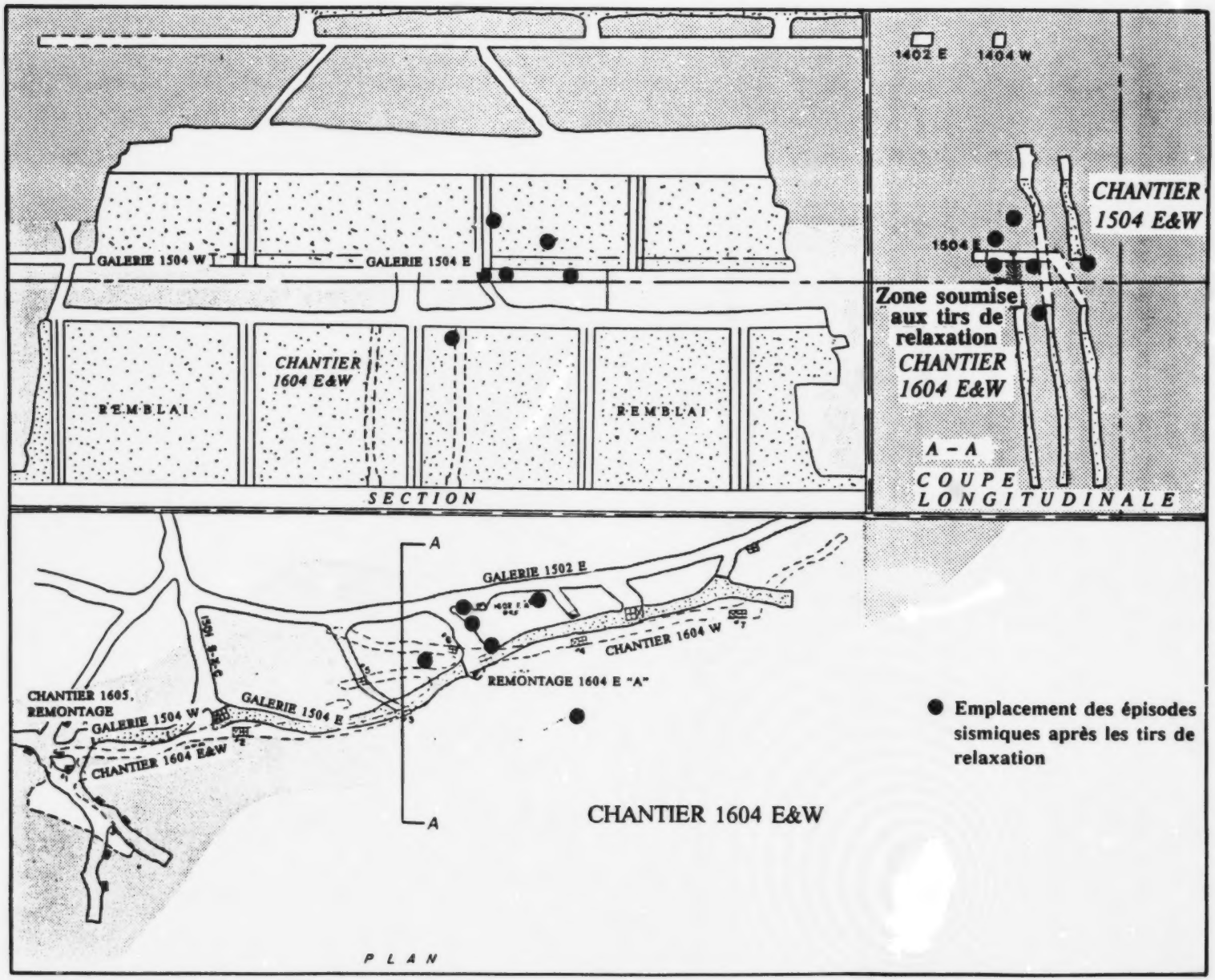


Figure 15 – Emplacement des épisodes sismiques après les tirs de relaxation

Une fois ce travail terminé, on exploitera le stot du filon 'A', en prélevant le pilier sur toute sa hauteur (9 m), avec des fronts de taille de 3 m de long. On prévoit que le terrain posera des problèmes dans le cas de ce pilier, à mesure que l'exploitation minière progressera au–delà de la zone d'ombre des filons 'C' et 'B'. À ce moment–là, on procédera à la relaxation des contraintes dans le pilier au–devant du front de taille, en forant des trous supplémentaires qui se prolongent à 3 m en avant de l'extrémité du front de taille.

REMERCIEMENTS

Les auteurs désirent exprimer leurs remerciements aux employés de la Campbell Red Lake Mines Ltd., pour leurs encouragements, et les efforts qu'ils ont déployés lors de l'installation du matériel destiné à cet essai de relaxation. La présente recherche a été faite dans le cadre du projet conjoint sur les coups de toit, entre le Canada, l'Ontario et l'industrie.

BIBLIOGRAPHIE

Ambrasey, N.R. et Hendron, A.J. Dynamic behaviour of rock masses; Rock Mechanics in Engineering Practice, John Wiley & Sons Ltd., 1968.